БИБЛИОТЕКА ПО АВТОМАТИКЕ

Выпуск 12

В. А. АЦЮКОВСКИЙ

ЕМКОСТНЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1960 ЛЕНИНГРАД

ЭЭ-5(4)-3

В книге рассматриваются принцип работы, основные типы и области применения емкостных дифференциальных датчиков перемещения, приводятся примеры расчета емкостных датчиков, даются некоторые рекомендации по построению следящих систем переменного тока с емкостными датчиками перемещения и их элементов.

Книга рассчитана на инженеров и техников, работающих в области автоматического регулирования и измерения неэлектрических величин электрическими методами.

Владимир Акимович Ацюковский

ЕМКОСТНЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Редактор *Д. В. Свечарник* Техн. редактор *К. П. Воронин*

Сдано в набор 28/XII 1959 г. Подписано к печати 16/III 1960 г.
Т-04012 Бумага 84×108 1/32 5,3 печ. л. Уч.-изд. л. 5,7
Тираж 12 000 экз. Цена 2 р. 85 к. Заказ 671

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В предлагаемой книге рассмотрены принцип работы, основные типы и области применения емкостных дифференциальных датчиков перемещения, входящих в состав следящих систем переменного тока высокой точности, работающих на повышенной (~400 *гц*) частоте.

Наряду с теоретической частью и выводом формул, позволяющим производить расчет собственно емкостных датчиков, усилителей к следящим системам, а также наиболее существенных их погрешностей, в каждом разделе приведены примеры расчета с тем, чтобы читатель-инженер мог использовать материал в своей непосредственной работе.

В книге приведены рекомендации по практическому построению и наладке как самих датчиков, так и усилителей переменного тока с большим коэффициентом усиления и следящих систем переменного тока. При этом отдельные рекомендации могут быть использованы не только в следящих системах переменного тока с емкостными датчиками, но и в любых следящих системах, а также в некоторых узлах электро- и радиоаппаратуры.

Предлагаемый материал проверен автором экспериментально в тесном контакте с инженером Весбландом Д. М. и электромехаником Максимовым В. А., которым автор выражает глубокую признательность.

Автор

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в промышленности и для различных специальных целей широко применяются дистанционные измерения всевозможных величин. Многие из этих величин преобразуются в перемещение, и тогда задача сводится к дистанционному измерению величины хода измерительного органа (чувствительного элемента). Так, например, для замера давления достаточно измерить прогиб анероидной коробки, а для определения ускорения достаточно знать величину перемещения массы, закрепленной на пружине. Кроме того, очень часто нас интересует непосредственно относительное перемещение отдельных частей механизма, например угол поворота оси.

Для дистанционного измерения перемещений широкое распространение получили следящие системы, включающие в себя соответствующие датчики. Задачей такого датчика является преобразование величины хода чувствительного элемента (расстояния, угла поворота) в электрический сигнал, который и воспринимается следящей системой [Л. 1—4].

Существует большое количество типов датчиков перемещения. Наиболее распространены реостатные и индуктивные датчики, менее распространены емкостные, фотоэлектрические и некоторые другие специальные датчики, например лампы с механическим управлением и т. д.

Во многих случаях к датчикам перемещения предъявляются повышенные требования как в отношении точности, так и в отношении малого механического момента и пр. Эти требования возникают в приборах, от которых требуется высокая точность работы — в акселерометрах, гироскопических, мембранных приборах и других устройствах. Всем этим требованиям удовлетворить с помощью реостатных, индуктивных или фотодатчиков затруднитель-

но, а емкостные датчики до последнего времени разрабатывались в совершенно недостаточных масштабах.

Однако дальнейшее повышение требований в отношении точности, стабильности, малой величины механического момента, широкой регулировки заставляют конструкторов вновь обратиться к разработке емкостных датчиков.

До недавнего времени конструкторы относились с предубеждением к емкостным датчикам, полагая, что схемы с емкостными датчиками не обеспечивают ни достаточной точности, ни стабильности работы приборов. Считалось обязательным для получения устойчивого сигнала на выходе емкостного датчика питать его напряжением высокой частоты, достигающей сотен килогерц, а иногда даже десятков мегагерц [Л. 5, стр. 47; Л. 18]. Наличие такой высокой частоты в свою очередь приводило к потерям в паразитных емкостях, соединительных проводах и т. п. [Л. 1, стр. 70]. Для того чтобы повысить амплитуду сигнала, снимаемого с емкостного датчика, и улучшить стабильность показаний, некоторые авторы разработок применяли в первом каскаде усилителя электрометрические лампы, допускающие включение сотен мегом в цепь управляющей сетки [Л. 21] и т. д., однако все эти меры мало улучшали стабильность систем с емкостными датчиками и в то же время значительно усложняли конструкцию приборов.

Проведенные в настоящее время работы показали, что причина нестабильности работы систем с емкостными датчиками лежит в неправильном подходе конструкторов к проектированию датчиков, в частности, в неправильном расположении изолирующих элементов конструкции, нестабильность свойств которых и приводит к ошибкам в работе систем. Эти трудности оказались преодолимыми, и уже созданы приборы с емкостными датчиками, обеспечивающие высокие точности и стабильность работы, выдерживающие тяжелые режимы эксплуатации (см. гл. 6).

В настоящее время установлено, что емкостные датчики перемещения обладают целым рядом преимуществ по сравнению с другими датчиками перемещения. К их достоинствам относятся:

1) потребность весьма малых усилий для перемещения подвижной части (ротора) емкостного датчика;
2) малое потребление энергии;
3) простота изготовления;
4) использование дешевых материалов;

5) отсутствие контактов (в некоторых отдельных случаях — один токосъем с помощью кольца и щетки);

6) высокая точность и стабильность работы систем с емкостными датчиками;

7) возможность широкой регулировки приборов с некоторыми типами емкостных датчиков.

К недостаткам емкостных датчиков следует отнести высокое внутреннее сопротивление, достигающее десятков и даже сотен мегом, высокие требования к сопротивлению крепежных изолирующих деталей и необходимость работы на повышенной (по сравнению с 50 *гц*) частоте. Однако в большинстве случаев крепления емкостных датчиков могут быть выполнены и из обычных материалов, а практика показывает, что емкостные датчики дают хорошие результаты на широко распространенной частоте 400 *гц*.

Ценные качества емкостных датчиков — малая величина механического усилия, необходимого для перемещения его ротора, возможность регулировки выхода следящей системы и высокая точность работы — делают емкостные датчики перемещения незаменимыми в приборах, в которых допускаются погрешности лишь в сотые и даже тысячные доли процента, а поэтому необходимо емкостные датчики перемещения развивать и осваивать.

Глава первая

НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ

Емкостный датчик в общем случае представляет собой одну или несколько емкостей с изменяющимися параметрами.

Величина емкости между двумя параллельными пластинами определяется формулой

$$c = \frac{k\varepsilon S}{d} = \frac{\varepsilon S}{0{,}36\,\pi d} = 0{,}885\,\frac{\varepsilon S}{d}, \qquad (1)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость;
S — площадь перекрытия двух пластин, *см*²;
d — расстояние между ними, *мм*;
C — значение емкости, *пф* (10^{-12} *ф*);
k — коэффициент пропорциональности.

Для воздуха с достаточной степенью точности $\varepsilon = 1$.

Емкость C в цепи переменного тока создает сопротивление

$$x_C = \frac{10^6}{\omega C} = \frac{10^6}{2\pi f C} = \frac{1{,}59 \cdot 10^5}{fC}, \qquad (2)$$

где f — частота, *гц*;
x_C — сопротивление, *Мом*.

Емкостные датчики можно разделить на две основные группы — датчики параметрические (недифференциальные) и датчики дифференциальные.

В схемах с параметрическими датчиками происходит преобразование входной неэлектрической величины (угла поворота оси ротора датчика) в электрическую выходную величину (частоту, ток, напряжение), функционально зависящую от входной величины.

В схемах с дифференциальными датчиками, включенными в следящие системы, с датчика снимается лишь сигнал рассогласования, который становится равным нулю в установившемся состоянии следящей системы.

Примером параметрического емкостного датчика может служить переменная емкость, включенная в контур лампового генератора (рис. 1) [Л. 1 и 6]. Здесь при изменении угла поворота оси ротора изменяется емкость датчика и меняется частота генератора, являющаяся выходной величиной.

На рис. 2 приведен другой пример использования параметрического датчика. В этом случае с изменением значе-

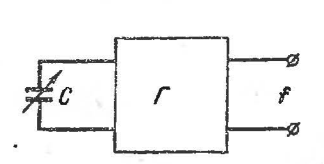


Рис. 1. Емкостный датчик, включенный в контур генератора.

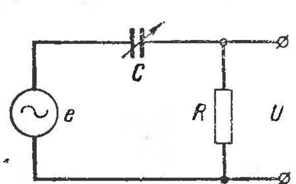


Рис. 2. Емкостный датчик, включенный в цепь переменного тока.

ния емкости C меняется ток через нее, а следовательно, и напряжение на выходе системы, падающее на сопротивлении нагрузки $R_н$, которое и является выходной величиной.

Подобные системы являются разомкнутыми системами регулирования. Основным недостатком этих схем является зависимость значения выходной величины от параметров источника питания датчика, усилителя и других элементов схемы, а также от внешних условий. В самом деле, стоит измениться напряжению или частоте генератора, питающего датчик (рис. 2), как напряжение, частота и фаза, являющиеся выходными величинами и снимаемые с сопротивления $R_н$, также изменятся.

От этих недостатков свободны схемы с дифференциальными емкостными датчиками, включенными в замкнутую систему автоматического регулирования. В этих схемах выходной величиной является угол поворота оси отрабатывающего двигателя или другой оси, связанной с нею через редуктор. Одной из основных характеристик такой системы является чувствительность, показывающая, при каком минимальном отклонении чувствительного элемента система отработки приходит в действие. Внешние факто-

ры — напряжение питания, температура окружающей среды и т. п. — влияют лишь на чувствительность системы; на точность системы они могут влиять лишь в той мере, в какой она связана с чувствительностью.

Это значит, что схемы с емкостными дифференциальными датчиками, так же как и любые мостовые нулевые схемы с линейными относительно частоты и напряжения сопротивлениями в плечах, предъявляют значительно меньшие требования к стабильности источника питания.

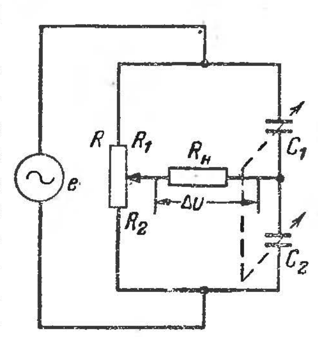


Рис. 3. Мостовая схема с емкостным дифференциальным датчиком.

В простейшем случае дифференциальный емкостный датчик представляет собой две последовательно включенные емкости, построенные конструктивно таким образом, что при увеличении одной из них другая уменьшается. Эти две емкости могут быть включены в мостовую схему (рис. 3), где два других плеча — реостатные. Если при этом напряжение, снимаемое с диагонали моста, использовать в качестве сигнала для следящей системы, перемещающей щетку потенциометра R в сторону уменьшения рассогласования, то всегда в установившемся состоянии следящей системы это напряжение $\Delta u = 0$. В этом случае справедливо соотношение

$$\frac{U_{R1}}{U_{R2}} = \frac{U_{C1}}{U_{C2}} = \frac{Ix_{C1}}{Ix_{C2}} = \frac{\frac{1}{\omega C_1}}{\frac{1}{\omega C_2}} = \frac{C_2}{C_1} = \frac{S_2 d_1}{S_1 d_2} \qquad (3)$$

Отсюда следует, что в схемах с дифференциальными емкостными датчиками с воздушным диэлектриком показания отрабатывающего органа (например, положение стрелки указателя) не зависят ни от состава газа, ни от наличия в нем влаги (не выпадающей в виде капель), так как для обеих емкостей, составляющих дифференциальный датчик, ε меняется одинаково. Для недифференциальных же схем такое влияние может наблюдаться, хотя и в небольших пределах, так как для воздуха с влажностью 0% $\varepsilon = 1{,}0006$, а для воздуха с влажностью 100% при $t = +20°$ С $\varepsilon = 1{,}0008$ [Л. 7]. В этих схемах эта величина составит соответственно погрешность примерно 0,02%, в то время как

от некоторых систем с емкостными дифференциальными датчиками (как показано ниже) удалось добиться более высокой точности.

Сигнал, снимаемый с диагонали моста при небольшом отклонении от положения нуля — небольшом рассогласовании, очень мал по мощности (при частоте 400 *гц* порядка десятых долей милливатта). Поэтому для приведения в действие отрабатывающей оси необходим усилитель, подающий сигнал на двигатель. В простейшем виде схема представлена на рис. 4,*а* и 4,*б*.

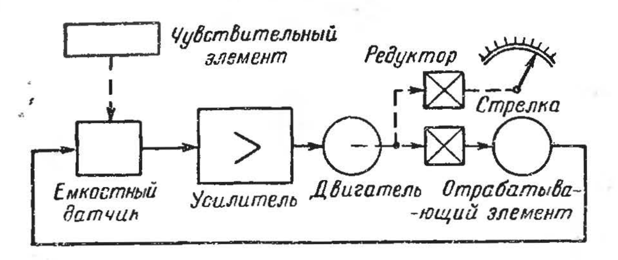


Рис. 4а. Структурная схема следящей системы с емкостным дифференциальным датчиком.

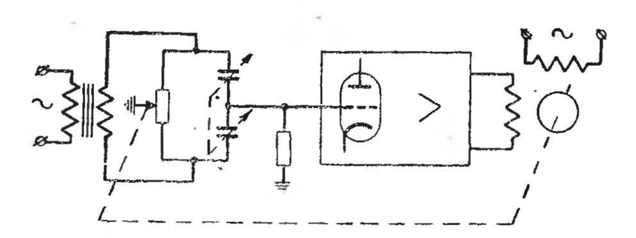


Рис. 4б. Схема следящей системы с емкостным дифференциальным датчиком.

Мост, состоящий из двух емкостей дифференциального емкостного датчика и потенциометра, питается напряжением переменного тока от отдельной обмотки трансформатора, щетка потенциометра заземлена, с ротора датчика снимается сигнал рассогласования, поступающий на управляющую сетку лампы первого каскада лампового усилителя. После усиления сигнал поступает на управляющую обмотку двухфазного асинхронного двигателя, обмотка возбуждения которого присоединена к той же сети перемен-

ного тока, от которой питается и мостовая схема с дифференциальным датчиком. Двигатель, вращаясь, перемещает щетку потенциометра так, чтобы восстановить равновесие моста, после чего отработка прекращается, так как управляющий сигнал при этом становится равным нулю. Выходной величиной здесь является положение щетки потенциометра, угол поворота оси ротора двигателя или угол поворота одной из осей редуктора, соединяющей двигатель со щеткой потенциометра.

Емкостные датчики являются датчиками с высоким внутренним сопротивлением, поэтому целесообразно иметь усилитель с возможно более высоким входным сопротивлением. К сожалению, в настоящее время нет никаких других надежных элементов с высоким входным сопротивлением, кроме электронных ламп. Поэтому для схем с емкостными датчиками целесообразно применять ламповый усилитель переменного тока. Выходные же каскады, обслуживающие двигатель, могут быть выполнены по какой-либо из известных схем на любых элементах, согласуемых с выбранным двигателем.

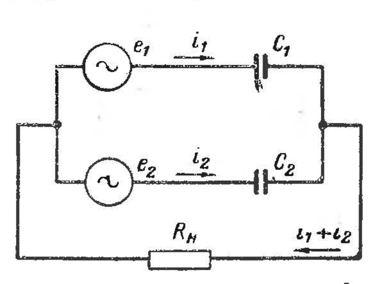


Рис. 5. Эквивалентная схема моста с емкостным дифференциальным датчиком.

Для расчета коэффициента усиления системы с емкостным датчиком необходимо знать крутизну выходного сигнала, снимаемого с диагонали моста:

$$s = \left(\frac{\partial \Delta u}{\partial \delta}\right)_{\Delta u = 0}, \tag{4}$$

где Δu — сигнал, снимаемый с диагонали моста;

δ — обобщенное перемещение (угол поворота или поступательное перемещение ротора датчика).

Кроме того, нужно знать фазу сигнала, снимаемого с диагонали моста.

Определим крутизну и фазу сигнала, снимаемого с диагонали моста, включающего в себя емкостный дифференциальный датчик (рис. 3), рассмотренный выше.

Эквивалентная схема моста с датчиком представлена на рис. 5 (примем, что сопротивление потенциометра много

меньше сопротивления нагрузки $R_н$). Составим уравнения схемы:

$$\left.\begin{aligned} e_1 &= \frac{1}{C_1 p} i_1 + R(i_1 + i_2); \\ e_2 &= \frac{1}{C_2 p} i_2 + R(i_1 + i_2). \end{aligned}\right\} \quad (5)$$

Из уравнений (5) найдем $\Delta u = R(i_1 + i_2)$:

$$\Delta u = \frac{e_1 C p - e_2 C_2 p}{1 + R(C_1 + C_2) p} R. \quad (6)$$

Положим:

$$e_1 = -e_2 = e; \; C_1 = C + \Delta C; \; C_2 = C - \Delta C;$$

тогда

$$\Delta u = \frac{2e \, \Delta C \, Rp}{1 + 2RCp} . \quad (7)$$

Заменив $p = j\omega$ и произведя необходимые вычисления, получим:

$$\Delta u = \frac{2e \, \Delta C \, \omega R}{\sqrt{1 + 4R^2C^2\omega^2}} \sin(\omega t - \varphi), \quad (8)$$

где

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{1}{RC\omega} .$$

Произведение $RC\omega \ll 1$, следовательно, при малых размерах емкостных датчиков и низких частотах (400 *гц*) емкостный датчик дает большой сдвиг фазы. Так, при $f = 400$ *гц*, $C = 50$ *пф*, $R_н = 1,0$ *Мом* $\varphi = 83°$.

Крутизна характеристики находится из выражения:

$$s = \frac{\partial \Delta U}{\partial \delta} = \frac{2e\omega R}{\sqrt{1 + R^2C^2\omega^2}} \cdot \frac{\partial C}{\partial \delta} .$$

Если $d = \text{const}$, то

$$s = \frac{1,77 \, e\omega R\varepsilon}{d} \cdot \frac{\partial S}{\partial \delta} , \quad (9)$$

Если $S = \text{const}$, то

$$s = \frac{1,77 e\omega R\varepsilon S}{d^2} . \quad (10)$$

При работе с емкостными датчиками иногда приходится учитывать механические силы, возникающие в них.

Если конденсатор заряжен, между его обкладками действует механическая сила, стремящаяся сблизить их. В зависимости от конструкции датчика эта сила будет направлена либо на сближение пластин (при $S=\text{const}$), либо на затягивание подвижной пластины под одну из неподвижных (при $d=\text{const}$).

Энергия заряженного конденсатора определяется выражением

$$W=\frac{U^2C}{2}, \tag{11}$$

а сила при $U=\text{const}$

$$F=\frac{\partial W}{\partial \delta}=\frac{U^2\partial C}{2\partial \delta}, \tag{12}$$

где δ — обобщенное перемещение.

Так как $U=U_m \sin \omega t$, то

$$F=\left(\frac{U^2_{\text{дейст}}}{2}+U^2_{\text{дейст}}\cos 2\omega t\right)\frac{\partial C}{\partial \delta}. \tag{13}$$

Среднее значение силы равно:

$$F_{\text{ср}}=\frac{U^2_{\text{дейст}}}{2}\cdot\frac{\partial C}{\partial \delta}. \tag{14}$$

Обычно в емкостных датчиках пульсации с двойной частотой совершенно не сказываются вследствие инерции пластины ротора, поэтому достаточно рассматривать среднее значение силы.

Значение силы и момента для всех емкостных датчиков дается формулами:

$$F=\frac{U^2}{2}\frac{\partial C}{\partial \delta}; \qquad M=\frac{U^2}{2}\frac{\partial C}{\partial \alpha}.$$

Для датчиков с $d=\text{const}$ (датчики с переменной S):

$$\left.\begin{aligned} F&=\frac{U^2\varepsilon}{2d}\frac{\partial S}{\partial \delta}=4{,}43\cdot 10^{-8}\frac{U^2b}{d};\\ M&=\frac{U^2\varepsilon}{2d}\frac{\partial S}{\partial \alpha}=4{,}43\cdot 10^{-8}\frac{U^2b\rho}{d}.\end{aligned}\right\} \tag{15}$$

Для датчиков с $S=\text{const}$ (датчики с переменным d):

$$F=4{,}43\cdot 10^{-7}\frac{U^2S}{d^2}, \tag{16}$$

где S — площадь перекрытия пластин, $см^2$;
d — расстояние между ними, *мм*;
U — напряжение на пластинах, *в*;
F — сила, возникающая между ними, *Г*;
M — момент, действующий на подвижную пластину, *Г·см*;
b — ширина пластин, *см*;
ρ — средний радиус пластины, *см* (для поворотного датчика).

Пример. Рассчитать силу, действующую между двумя пластинами конденсатора, если:
напряжение между пластинами $U=100$ *в*;
площадь пластин $S=2$ *см*;
расстояние между пластинами $d=1$ *мм*.
Расчет ведется по формуле (16):

$$F=4{,}43\cdot10^{-7}\cdot100^2\cdot2=9\cdot10^{-3}\ Г=9\ мГ.$$

Пример. Рассчитать момент, возникающий в датчике с переменной площадью пластин $S(d=\text{const})$, если:
напряжение на одной пластине $u_1=100$ *в*;
ширина пластины $b=1$ *см*;
средний радиус датчика $\rho=2$ *см*.
Расстояние между пластинами статора и ротора $d=1$ *мм*.
Расчет ведется по формуле (15):

$$M=4{,}43\cdot10^{-8}\cdot100^2\cdot1\cdot2=9\cdot10^{-4}\ Г\cdot см=0{,}9\ мГ\cdot см.$$

Помимо схем емкостных датчиков с одной подвижной частью — ротором, где отработка ведется на каком-либо другом элементе (потенциометре, сельсине), существуют схемы с емкостными датчиками, с отработкой на статор этого же датчика (рис. 6,*а* и 6,*б*). В таких схемах могут быть использованы любые дифференциальные датчики. Та-

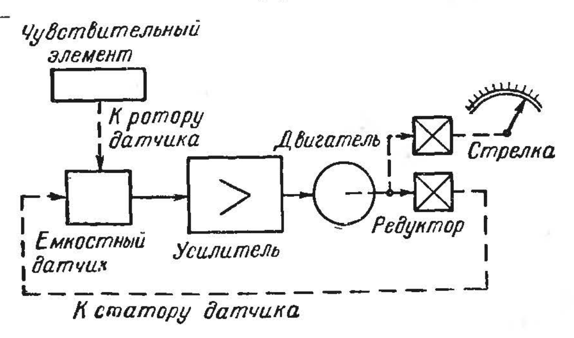


Рис. 6а. Структурная схема следящей системы с отработкой на статор емкостного датчика.

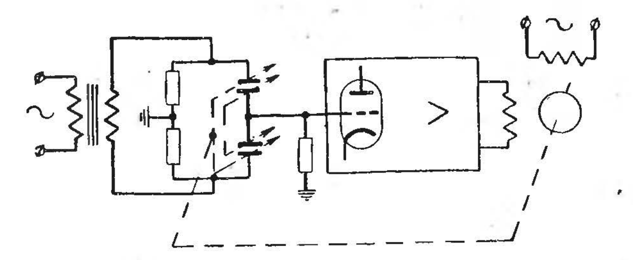


Рис. 6б. Схема следящей системы с отработкой на статор емкостного датчика.

кое построение выгодно там, где не нужна дистанционная передача. При этом точность работы системы повышается, инструментальная погрешность изготовления самого датчика (за исключением несовпадения осей ротора относительно статора) в таком случае не играет роли. В такой системе выходная ось следует за входной осью линейно.

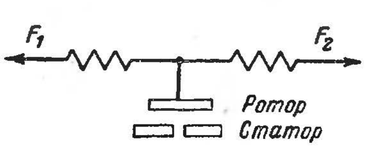


Рис. 7. Применение емкостного датчика в качестве нуль-индикатора.

Существуют также устройства, в которых отработка ведется непосредственно на ротор емкостного датчика. Например, при сравнении двух механических усилий на пружинящую опору ротора емкостного датчика действует разность этих усилий (рис. 7), а сигнал рассогласования используется для уравнивания этих усилий.

Выбор типа датчика и способа отработки производится конструктором исходя из конкретных требований, предъявляемых к проектируемому прибору.

Глава вторая

ДВУХЛУЧЕВЫЕ ЕМКОСТНЫЕ ДАТЧИКИ

1. Датчики с переменным d

Емкостные дифференциальные датчики с переменным d устроены в основном одинаково: между двумя параллельными пластинами, расположенными одна против другой, на которые подается э. д. с., помещается третья подвижная пластина—ротор, перемещающаяся поступательно. С этой пластины и осуществляется съем сигнала на усилитель (рис. 8). Такой датчик целесообразно использовать в си-

стемах с небольшим поступательным перемещением. Эквивалентная схема включения датчика изображена на рис. 9.

Обозначим через d_1 расстояние между нижней пластиной статора и пластиной ротора, а через d_2 — расстояние

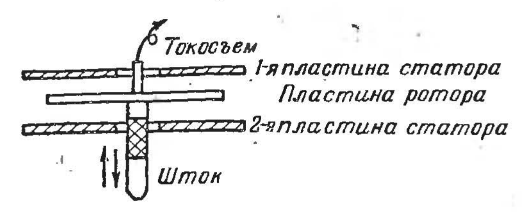


Рис. 8. Емкостный датчик с переменным d.

между пластиной ротора и верхней пластиной статора. При этом $d_1+d_2=d_0=\text{const}$; $S_1=S_2$; $e_1+e_2=e_0$.

Составим уравнение равновесия моста:

$$\frac{e_1}{e_2}=\frac{U_1}{U_2}=\frac{Ix_{C1}}{IxC_2}=\frac{\frac{1}{\omega C_1}}{\frac{1}{\omega C_2}}=\frac{C_2}{C_1}=\frac{\varepsilon\frac{S_2}{d_2}}{\varepsilon\frac{S_1}{d_1}}=\frac{d_1}{d_2};$$

$$\frac{e_1}{e_2}=\frac{d_1}{d_2}; \tag{17}$$

$$e_1=\frac{e_0}{d_0}d_1. \tag{18}$$

Таким образом, в схеме с потенциометрической отработкой, изображенной на рис. 10, отработка будет линейной при условии равенства площади перекрытия пластин.

Рассмотрим механические силы, действующие на ротор датчика с переменным d. Определим механические силы при $U_1=U_2=U$. Тогда

$$W_1=\frac{U_1^2C_1}{2};\quad W_2=\frac{U_2^2C_2}{2};\quad F_1=\frac{\partial W_1}{\partial\delta};\quad F_2=\frac{\partial W_2}{\partial\delta};$$

$$F_1=-4{,}43\cdot10^{-7}\frac{U^2\varepsilon S_1}{d_1^2};$$

$$F_2=+4{,}43\cdot10^{-7}\frac{U^2\varepsilon S_2}{d_2^2};$$

$$F=F_1+F_2=$$

$$=4{,}43\cdot10^{-7}U^2\varepsilon\left(\frac{S_2}{d_2^2}-\frac{S_1}{d_1^2}\right). \tag{19}$$

Рис. 9. Эквивалентная схема включения датчика с переменным d.

При $S_1=S_2$ и $d_1=d_2$ $F=0$.

Таким образом, механическое усилие, действующее на ротор датчика с переменным d в среднем положении при равновесии системы, равно нулю.

Положим $d_1 > d_2$, но $U_1 = U_2$. Тогда $F > 0$. Знак «+» означает стремление силы увеличить координату. Следовательно, механическая сила направлена в сторону от положения равновесия, и положение ротора, строго говоря, неустойчиво. Абсолютная величина силы мала, однако в некоторых системах эту силу все же приходится учитывать (например, в системах, где ротор датчика подвешен на упругой нити).

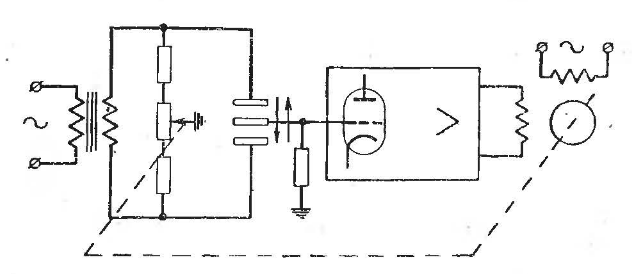


Рис. 10. Схема следящей системы с датчиком с переменным d и полным использованием отрабатывающего потенциометра.

Определим усилие, действующее на ротор датчика с переменным d при $U_1 \neq U_2$, но в положении равновесия:

$$F = 4{,}43 \cdot 10^{-7} \varepsilon S \left(\frac{U_2^2}{d_2^2} - \frac{U_1^2}{d_1^2} \right).$$

В положении равновесия

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{d_1}{d_2}.$$

Следовательно, и в этом случае $F = 0$.

Определим значение крутизны выходного сигнала на различных участках работы датчика с переменным d при условии равновесия системы.

Преобразовав уравнение (6) и пренебрегая членом $R(C_1 + C_2)$ по сравнению с единицей, получим:

$$\frac{\partial U}{\partial d_1} \approx 0{,}885 \cdot 10^{-12} \left[\omega R \varepsilon S \left(\frac{e_1}{d_1} - \frac{e_2}{d_2} \right) \right] = 0{,}885\, \omega R \varepsilon S \frac{e_0}{d_1 d_2} 10^{-12}, \quad (20)$$

или

$$\frac{\partial U}{\partial e_1} \approx 0{,}885 \omega R \varepsilon S \frac{e_0^2}{d_0} \cdot \frac{1}{e_1 e_2} 10^{-12}. \tag{21}$$

При линейной отработке крутизна сигнала не постоянна (увеличивается к краям диапазона).

Пример. Рассчитать крутизну сигнала и определить необходимый коэффициент усиления усилителя для микрометра с емкостным дифференциальным датчиком с переменным d.

Параметры датчика:

Датчик круглый с наружным диаметром пластин . .	$D_н = 30$ *мм*
Сумма зазоров	$d_0 = 2{,}5$ *мм*
Начальный зазор	$d_{10} = 0{,}2$ *мм*
Конечный зазор	$d_{20} = 0{,}3$ *мм*
Ход ротора	$\Delta d = 2{,}0$ *мм*
Допустимая нечувствительность . . . . (0,005% от диапазона)	$\delta d = 0{,}1$ *мк*
Напряжение питания датчика	$e_0 = 100$ *в*
Частота питания системы	$f = 400$ *гц*
Сопротивление утечки сетки первого каскада	$R_c = 1{,}0$ *Мом*
Мощность отрабатывающего потенциометра	$P_п = 5{,}0$ *вт*
Напряжение трогания отрабатывающего двигателя . .	$U_{тр} = 1{,}0$ *в.*

Схема системы изображена на рис. 10.

Расчет системы ведется на минимальную крутизну сигнала:

$$d_1 = d_2 = \frac{d_0}{2} = 1{,}25 \text{ мм};$$

$$\Delta U = 0{,}885 \cdot 10^{-12} \omega R \varepsilon S e_0 \frac{1}{d_1 d_2} \delta d =$$

$$= \frac{0{,}885 \cdot 10^{-12} 2\pi 400 \cdot 10^6 \cdot 1\pi \cdot 1{,}5^2 \cdot 100 \cdot 10^{-14}}{1{,}25^2} = 0{,}1 \text{ мв}.$$

Коэффициент усиления усилителя (по напряжению)

$$k = \frac{U_{тр}}{\Delta U}; \tag{22}$$

$$k = \frac{1}{0{,}1 \cdot 10^{-3}} = 10\,000.$$

Усилители, пригодные для данного случая, с выходом на двигатели ДИД-0,5 и ДГ-0,5 изображены на рис. 59 и 60.

Мощность, потребляемая цепью сопротивлений моста:

$$P = P_п \frac{d_0}{\Delta d} = 5 \frac{2{,}5}{2} = 6{,}25 \text{ вт}.$$

Общее сопротивление цепи

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{10^4}{6,25} = 1\,600\ ом^*.$$

Принимаем $R_п = 2\,000$ *ом*. Найдем добавочные сопротивления:

$$R_{10} = R_п \frac{d_{10}}{\Delta d} = 2\,000 \frac{0,2}{2} = 200\ ом;$$

$$R_{20} = R_п \frac{d_{20}}{\Delta d} = 2\,000 \frac{0,3}{2} = 300\ ом.$$

2. Датчики с переменной S

Емкостные дифференциальные датчики с переменной площадью и постоянным зазором разработаны в нескольких вариантах.

Наиболее простым является датчик с плоскими пластинами статора и ротора, где сигнал снимается с ротора (рис. 11).

Его модификацией являются два плунжерных датчика, изображенных на рис. 12 и 13.

Статор датчика, изображенного на рис. 12, состоит из двух колец, запрессованных в пластмассу. Ротор — металлический цилиндр, закрепленный на изоляционной втулке, укрепленной на штоке, который перемещается вдоль оси. Шток исполняется полым, сигнал с ротора передается проводником, проходящим внутри штока, и затем безмоментным волоском на вход усилителя. Этот датчик пригоден как для дистанционной передачи с отработкой на потенциометр, так и для отработки на статор.

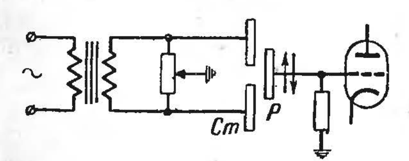


Рис. 11. Включение датчика с переменной S в схему.

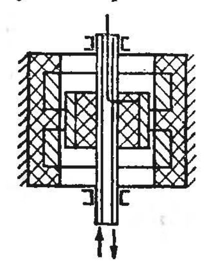


Рис. 12. Плунжерный емкостный дифференциальный датчик.

* Таким образом, допущения, сделанные при составлении эквивалентной схемы рис. 5, справедливы.

Статор датчика, изображенного на рис. 13 [Л. 8], состоит из двух витых лент, впрессованных в пластмассовый цилиндр. Цилиндр статора укреплен на подшипниках и может поворачиваться вокруг оси. Ротор представляет собой металлический цилиндр с винтовой нарезкой. Шаг резьбы статора и ротора одинаков. Отработка производится на статор датчика. При этом ротор перемещается поступательно вдоль оси, а статор поворачивается вокруг этой оси.

В данной схеме отсутствует ряд погрешностей, присущих системам с другими датчиками перемещения, например шаговая погрешность и некоторые другие. В связи с тем, что отрабатывающая ось делает поворот на значительный угол, эту систему можно использовать и для дистанционной передачи данных, использовав во второй ступени обыкновенную дистанционную передачу на сельсинах, получив в общем высокую точность.

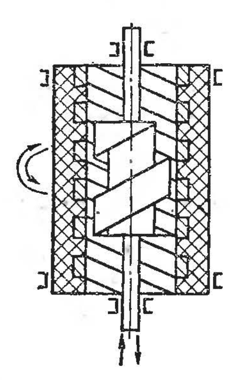


Рис. 13. Винтовой емкостный дифференциальный датчик.

При поступательном перемещении ротора возникает сигнал рассогласования, для его ликвидации отрабатывающий двигатель поворачивает статор в сторону уменьшения рассогласования. Таким образом, на датчике преобразуется поступательное движение ротора во вращательное движение статора, причем зависимость между ними линейная. Подобная схема не является дистанционной. Тем не менее, она может найти широкое применение для микрометров высокой точности и других точных приборов. При небольшом шаге нарезки малое перемещение ротора вызывает значительный угол поворота статора. При диаметре ротора 10 *мм*, длине его 15—20 *мм* и частоте питания 400 *гц* точность такой системы может достигать десятых долей микрона.

На рис. 14 изображен другой вид емкостного дифференциального датчика с переменной S. Здесь ротор датчика заземлен, а съем сигнала осуществляется с неподвижной пластины, расположенной симметрично относительно питающих пластин.

Эквивалентная схема включения датчика с неподвижным токосъемом изображена на рис. 15.

Здесь C_1 и C_2 — емкости соответственно между первой

и второй статорными пластинами и ротором; C_1' и C_2' — емкости соответственно между первой и второй статорными пластинами и заземленной пластиной ротора; C_0' — емкость между пластиной токосъема и заземленной пластиной ротора ($C_0' = \text{const}$).

Рассмотрим влияние этих емкостей на выходной сигнал. Емкости C_1' и C_2' шунтируют низкоомные цепи отрабатывающего потенциометра. Так как их абсолютное значение очень мало, они практически не искажают работу низкоомного (десятки килоом) потенциометра. Емкость C_0' постоянна, мала, ее влияние скажется в небольшом умень-

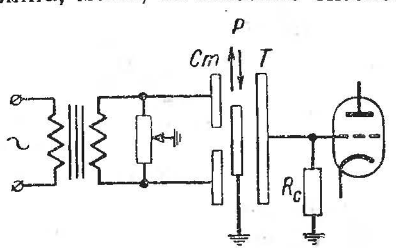


Рис. 14. Включение емкостного дифференциального датчика с неподвижным токосъемом.

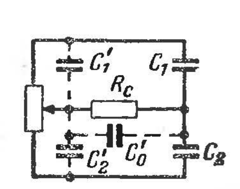


Рис. 15. Эквивалентная схема с неподвижным токосъемом.

шении выходного сигнала и изменении сдвига фазы. Емкости C_1 и C_2 являются основными рабочими емкостями, определяющими работу системы, так же как и в случае съема сигнала с ротора.

По сравнению с датчиком, изображенным на рис. 11, этот датчик с неподвижным токосъемом имеет ряд преимуществ:

1. Ротор датчика заземлен, что, как правило, сделать конструктивно проще, чем тщательно изолировать его.

2. Съем сигнала осуществляется с неподвижной пластины, следовательно, не надо устраивать скользящих или волосковых контактов.

3. Датчик с неподвижным токосъемом легче экранировать от наводок.

4. При перемещении пластины ротора в направлении, перпендикулярном ходу, крутизна выходного сигнала не меняется.

5. Уменьшаются требования к изоляции промежутка между питающими пластинами, так как он всегда экранирован от токосъема заземленной пластиной.

Этот датчик может найти применение в качестве нулевого датчика в таких приборах, как акселерометры с отработкой рассогласования, а также в дистанционных передачах с ограниченным углом перемещения. В этом случае целесообразно выполнить его по рис. 16.

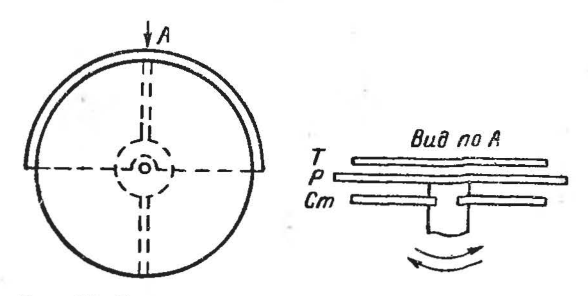


Рис. 16. Датчик с неподвижным токосъемом для дистанционной передачи.

Составим уравнение моста, включающего датчик с переменной S при $d_1 = d_2$:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I}{I} \cdot \frac{x_{C1}}{x_{C2}} = \frac{\dfrac{1}{\omega C_1}}{\dfrac{1}{\omega C_2}} = \frac{C_2}{C_1} = \frac{\dfrac{\varepsilon S_2}{d_2}}{\dfrac{\varepsilon S_1}{d_1}} = \frac{S_2}{S_1}; \qquad (23)$$

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{S_2}{S_1},$$

или

$$e_1 = \frac{e_0}{S_0} S_2, \qquad (24)$$

где

$$S_0 = S_1 + S_2 = \text{const};$$
$$e_0 = e_1 + e_2 = \text{const}.$$

Из (24) следует, что так же, как и в случае датчика с переменным d, в схеме с датчиком с переменной S и потенциометрической обработкой зависимость между углами поворота оси ротора и щетки потенциометра линейная. Разница заключается лишь в том, что если в схеме с переменным d при движении ротора датчика к пластине a щетка

потенциометра отрабатывалась так же к пластине *а*, то в схеме с переменной S при повороте ротора к пластине *а* щетка потенциометра отрабатывается к пластине *б* и наоборот (рис. 17).

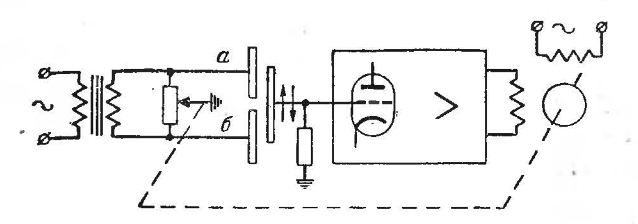


Рис. 17. Схема следящей системы с датчиком с переменной S и отработкой на потенциометр.

Рассмотрим механические силы, действующие на ротор датчика с переменной S:

$$W_1=\frac{U_1^2C_1}{2};\ W_2=\frac{U_2^2C_2}{2};\ F_1=\frac{\partial W_1}{\partial\delta};\quad F=\frac{\partial W_2}{\partial\delta};$$

$$F_1=0{,}443\cdot10^{-8}U_1^2\,\varepsilon\,\frac{\partial S}{d_1\partial\delta};\ F_2=0{,}443\cdot10^{-8}U_2^2\,\varepsilon\,\frac{\partial S}{d_2\partial\delta}.$$

Но $\frac{\partial S}{\partial\delta}=b=\text{const}$; а $d_1=d_2=d$.

$$F=F_1+F_2=0{,}443\cdot10^{-8}\frac{b\varepsilon}{d}(U_1^2-U_2^2). \qquad (25)$$

Таким образом, $F=0$ только при $U_1=U_2$, т. е. в середине датчика. Во всех остальных случаях, если положение рассогласования отрабатывается, $F\neq0$. Если же система построена так, что отрабатывается сам ротор датчика обратно в нулевое положение и $U_1=U_2=\text{const}$ всегда, то дополнительное усилие, испытываемое ротором со стороны статорных пластин, равно нулю в любой точке при установившемся положении ротора. Этот вывод правилен лишь до тех пор, пока ротор датчика находится под обеими пластинами статора. Если же ротор выведен за пределы одной из пластин статора, он испытывает силу $F=0{,}443\frac{b\varepsilon}{d}U^2$, втягивающую его под вторую пластину. Следовательно, диапазон отклонения ротора датчика должен быть ограничен. Диапазон отклонения ротора должен быть ограничен

также еще и потому, что в противном случае ротор выйдет за пределы статора, и сигнал, снимаемый с ротора, после некоторого максимума начнет уменьшаться, хотя рассогласование будет расти. После того как роторная пластина совсем выйдет за пределы статора, сигнал, снимаемый с токосъема, будет равен нулю.

Определим значение крутизны выходного сигнала на различных участках датчика с переменной S при условии равновесия системы. Преобразовав уравнение (6) и пренебрегая членом $R(C_1+C_2)$ по сравнению с единицей, получим:

$$\frac{\partial U}{\partial S} \approx \left[0{,}885\cdot 10^{-12}\frac{\omega R\varepsilon}{d}(e_1S_1 - e_2S_2)\right]_{S_1}.$$

Считая $dS_1 = -dS_2$, при рассогласовании системы со стороны датчика получим:

$$\frac{\partial U}{\partial S} \approx 1{,}77\cdot 10^{-12}\frac{\omega R\varepsilon\, e_0}{d}, \tag{26}$$

или

$$\frac{\partial U}{\partial \delta_x} \approx 1{,}77\cdot 10^{-12}\,\frac{\omega R\varepsilon e_0 b}{d}$$

— для поступательных датчиков и

$$\frac{\partial U}{\partial \alpha} \approx 1{,}77\cdot 10^{-12}\,\frac{\omega R\varepsilon e_0 b\rho}{d} \tag{27}$$

для поворотных датчиков,

где b — ширина пластины статора;

ρ — средний радиус статора;

δ_x — перемещение ротора, *см*.

При рассогласовании системы со стороны указателя

$$\frac{\partial U}{\partial e_1} \approx 0{,}885\cdot 10^{-12}\,\frac{\omega R\varepsilon S_0}{d}, \tag{28}$$

где

$$S_0 = S_1 + S_2.$$

Таким образом, крутизна сигнала, снимаемого с датчика, постоянна в любой точке диапазона.

Нужно отметить, что выведенные формулы пригодны для датчиков с переменной S любой конструкции.

Пример. Рассчитать емкостный поворотный датчик с переменной S с неподвижным токосъемсм и определить коэффициент усиления усилителя системы при следующих параметрах:

Среднний радиус статориых пластин	$\rho = 3$ *см*
Ширина пластины статора	$b = 1$ *см*
Зазор между пластинами и токосъемом	$d = 1$ *мм*
Максимальный угол поворота ротора (от нейтрального положеиия до упора)	$\alpha_{макс} = 10°$
Частота питания	$f = 400$ *гц*
Напряжение питания	$U = 100$ *в*
Сопротивление утечки сетки первого каскада . . .	$R_c = 1{,}0$ *Мом*
Напряжение трогания двигателя	$U_{тр} = 1{,}0$ *в*
Допустимая нечувствительность	$\delta\alpha = 1'' = 4{,}8 \times 10^{-6}$ *рад*

Расчет ведется по формуле (27).

Сигнал при допустимой нечувствительности:

$$\Delta U_{неч} = \frac{1{,}77 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 400 \cdot 10^{6} \cdot 1 \cdot 100 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 4{,}8 \cdot 10^{-6}}{1} = 6{,}4 \cdot 10^{-6} \ в;$$

Необходимый коэффициент усиления

$$k = \frac{1}{6{,}4 \cdot 10^{-6}} = 1{,}6 \cdot 10^{5}.$$

В данном случае может быть применен усилитель, описанный в гл. 5.

Пример. Рассчитать винтовой емкостный датчик с переменной S и определить необходимый коэффициент усиления усилителя для микрометра со следующими параметрами:

Диаметр ротора датчика	$D_p = 10$ *мм*
Величина зазора	$d = 0{,}2$ *мм*
Длина ротора	$l = 15$ *мм*
Ход ротора	$x_0 = 10$ *мм*
Частота питания	$f = 400$ *гц*
Напряжение питания	$e_0 = 100$ *в*
Сопротивление утечки сетки первого каскада	$R_c = 1{,}0$ *Мом*
Напряжение трогания двигателя	$U_{тр} = 1{,}0$ *в*
Допустимая иечувствительность	$\delta_x = 0{,}1$ *мк*

Отработка производится на статор датчика.

Так как ход ротора всего 10 *мм*, можно делать систему без дополнительного грубого отсчета. Принимаем шаг резьбы датчика $\lambda = 10$ *мм*.

Статор имеет двухзаходную резьбу.

Принимаем:

ширина металлической полосы $b_м = 3$ *мм*;

ширина промежутка

$$b_{из} = \frac{\lambda - 2b_м}{2} = 2 \ мм.$$

Ротор имеет однофазную резьбу. Принимаем ширину зуба $b_р = 5$ *мм*.

Внутренний диаметр ротора принимаем равным $D_{вн} = 6$ *мм*.

Длина внутренней полости статора

$$L > l + x_0 = 25 \text{ мм. } L = 30 \text{ мм.}$$

Чертеж датчика изображен на рис. 13.

Схема включения датчика в систему изображена на рис. 18.

Длина винтовой линии (эквивалентная ширина пластины)

$$b = \frac{l}{\lambda}\pi D = \frac{15}{10}\pi 10 = 47 \text{ мм} = 4{,}7 \text{ см.}$$

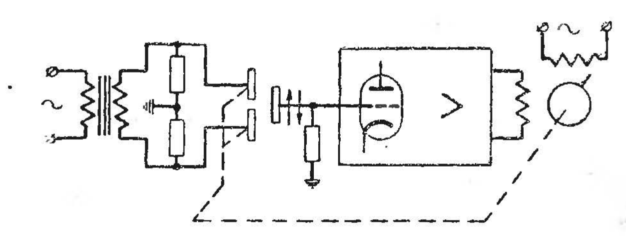


Рис. 18. Схема следящей системы с датчиком с переменной S и отработкой на статор датчика.

Пороговый сигнал при допустимой нечувствительности

$$\Delta U_{неч} = \frac{0{,}885 \cdot 10^{-12}}{d}\,\omega R \varepsilon e_0 b \Delta\delta =$$

$$= \frac{0{,}885 \cdot 10^{-12} \cdot 2\pi \cdot 400 \cdot 10^{6} \cdot 1 \cdot 100 \cdot 4{,}7 \cdot 10^{-5}}{0{,}2} = 5{,}2 \cdot 10^{-5} \text{ в.}$$

Необходимый коэффициент усиления усилителя

$$k = \frac{U_{тр}}{\Delta U_{неч}} = \frac{1}{5{,}2 \cdot 10^{-5}} = 19\,000.$$

При расчете мы пренебрегли членом $\sqrt{1 + 4R^2C^2\omega^2}$, равным примерно единице. Проверим допустимость этого.

Ширина перекрытия одной ленты статора и ротора

$$b_п = \frac{b_р - b_{из}}{2} = \frac{5 - 2}{2} = 1{,}5 \text{ мм.}$$

Площадь перекрытия одной ленты статора и ротора

$$S_п = b_п C = 1{,}5 \cdot 47 = 70 \text{ мм}^2 = 0{,}7 \text{ см}^2.$$

Емкость одной ленты статора и ротора

$$C = \frac{0{,}885S}{d} = \frac{0{,}885 \cdot 0{,}7}{0{,}2} = 3{,}1 \text{ пф};$$

$$\sqrt{1 + 4R^2C^2\omega^2} = \sqrt{1 + 4 \cdot 10^{12} \cdot 3{,}1^2 \cdot 10^{-24} \cdot 2{,}5 \cdot 10^6} =$$

$$= \sqrt{1{,}00024} = 1{,}00012.$$

Следовательно, пренебрежение допустимо.

В данном приборе усилители, изображенные на рис. 59 и 60, также пригодны для использования.

3. Исправление нелинейностей в следящих системах с емкостными датчиками

В некоторых случаях от следящей системы, включающей в себя емкостный датчик перемещения, требуется воспроизведение на выходе некоторой функции, отличной от линейной. Обычно такая задача возникает тогда, когда на выходе системы требуется линейное перемещение от не-

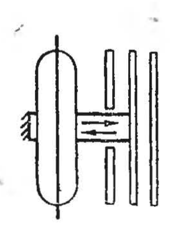


Рис. 19. Анероидный датчик давления.

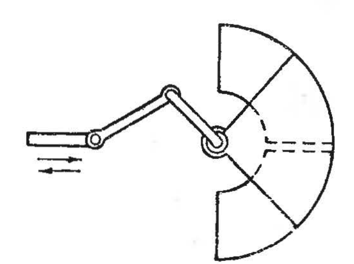


Рис. 20. Схема преобразования поступательного движения.

которой величины x, в то время как сам ротор датчика, приводимый в движение другой величиной $y = f(x)$, перемещается нелинейно от x. Такая задача возникает, например, в анероидных датчиках давления (рис. 19). Прогиб анероидных коробок не является точно линейной функцией от давления, в то время как отрабатывающая ось должна перемещаться точно линейно в соответствии с давлением. Другим примером является преобразование поступательного движения с помощью кривошипно-шатунного механизма во вращательное (рис. 20). Кривошипно-шатунный механизм имеет переменное передаточное отношение в течение хода. Поэтому одному и тому же приращению поступательного движения соответствуют при различных уг-

лах поворота ротора датчика различные приращения передаточного отношения. Во всех подобных случаях угол поворота выходной оси является некоторой функцией от перемещения входной оси — угла поворота ротора датчика.

Рассмотрим более подробно случай, когда ротор емкостного датчика перемещается нелинейно от некоторого параметра, а выходная ось должна перемещаться линейно относительно того же параметра.

Из уравнений (18) и (24) следует, что напряжение, снимаемое с одного плеча отрабатывающего потенциометра, пропорционально перемещению ротора емкостного датчика.

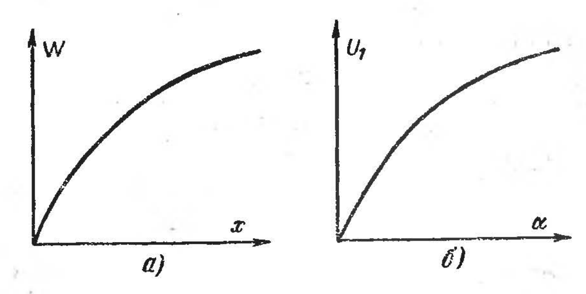


Рис. 21. Нелинейные характеристики системы.

Следовательно, если требуется получить линейное перемещение отрабатывающей оси от некоторого параметра, достаточно знать закон перемещения ротора емкостного датчика от этого параметра и добиваться воспроизведения этой функции напряжением, снимаемым с одного плеча потенциометрической схемы при линейном перемещении потенциометра. Например, ротор датчика перемещается по закону $W=f(x)$, изображенному на рис. 21,*а*. Для того чтобы отработка была линейной, нужно, чтобы выходное напряжение изменялось по закону $U_1=f(\alpha)$ (рис. 21,*б*), где $f(\alpha)$ отличается от $f(x)$ только коэффициентом пропорциональности.

Существует довольно много способов воспроизведения необходимых нелинейностей на потенциометрах. Среди них надо отметить такие, как намотка функционального потенциометра (рис. 22,*а*), шунтирование отдельных участков потенциометра добавочными постоянными сопротивлениями (рис. 22,*б*), различные варианты подключения постоянных сопротивлений к линейному потенциометру (рис. 22,*в*) и некоторые другие. Способы получения различных нелиней-

ностей на потенциометрах описаны в литературе [Л. 1, 9 и 10], однако пока еще нет простого и удобного способа построения заданной нелинейности простыми средствами — с помощью линейного потенциометра и небольшого количества добавочных сопротивлений.

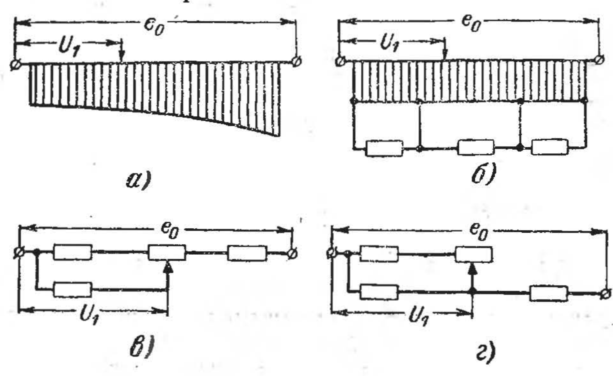


Рис. 22. Воспроизведение нелинейных функций на потенциометрах.

Помимо потенциометров, в отрабатывающих узлах могут быть применены и другие элементы, например сельсины. На рис. 23 представлена схема дистанционной передачи, в которой применен емкостный датчик с переменной S с неподвижным токосъемом, а в качестве отрабатывающего элемента — сельсин. Схема работает в ограниченном

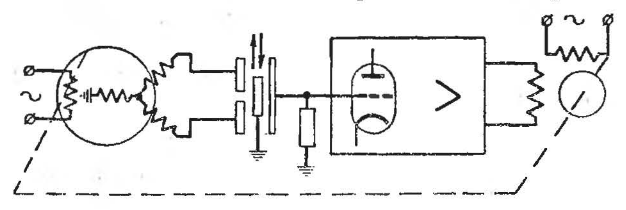


Рис. 23. Емкостная следящая система с отработкой на сельсин.

диапазоне, угол поворота ротора датчика колеблется в пределах $\pm 45°$.

При использовании датчика, изображенного на рис. 16, получим следующее выражение для зависимости угла отработки сельсина θ от угла заводки ротора датчика α:

$$\frac{\cos(\theta + 60°)}{\cos(\theta - 60°)} = \frac{\pi - 2\alpha}{\pi + 2\alpha},$$

или иначе

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{2\alpha}{\pi \sqrt{3}} \cdot \qquad (29)$$

Пример. Рассчитать датчик с неподвижным токосъемом и определить зависимость выходного угла от входиого для схемы рис. 23:

Напряжение питания ротора сельсина . . . $U_р=115 в$
Линейное напряжение статора . . . . $U=58$ в
Частота питания . . . . $f=400$ гц
Наружный диаметр датчика . . . . $D_н=40$ мм
Внутренний диаметр статора . . . . $D_{вн}=10$ мм
Величина зазора . . . . $d=1$ мм
Допустимая нечувствительность системы . . $\delta\alpha=1'$

Задаваясь значениями α от 0 до 45°, определим соответствующие значения θ:

α	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°
θ	0	1°51′	3°41′	5°29′	7°18′	9°06′	10°52′	12°37′	14°22′	16°4′

Введем между выходной осью и сельсином редуктор с коэффициентом редукции 2,8. Тогда

α	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°
θ	0	5°8′	10°16′	15°20′	20°26′	25°33′	30°20′	35°16′	40°10′	45′
$\theta-\alpha$	0	8′	16′	20′	26′	33′	20′	16′	10′	0

Сельсин имеет собственную инструментальную погрешность 20′. Приведенная к выходной оси она составит:

$$\delta_с = k_р \delta'_с = 2{,}8 \cdot 20 = 56'.$$

Результирующая максимальная погрешность будет равна:

$$\delta = \sqrt{56^2 + 33^2} = 65'.$$

Для исправления этой погрешности в данном случае требуется стандартный механический корректор[1] с возможностью регулировки в пределах 1,5° (у существующих корректоров угол регулирования составляет примерно 3—4°). Таким образом, существующие корректоры вполне удовлетворяют предъявляемым требованиям.

Определим крутизну выходного сигнала и коэффициент усиления усилителя.

---

[1] См. гл. 5, § 3.

При повороте ротора на угол $\delta\alpha$ площадь пластины изменится на

$$\delta S = \frac{D_{\text{н}}^2 - D_{\text{вн}}^2}{8}\,\delta\alpha. \tag{30}$$

Из формулы (26) следует:

$$\Delta U_{\text{неч}} = \frac{0{,}885 \cdot 10^{-12}\omega R\varepsilon e_0}{d}\,\delta S = 0{,}885\,\frac{\omega R\varepsilon e_0}{d} \cdot \frac{D_{\text{н}}^2 - D_{\text{вн}}^2}{8}\,\delta\alpha \cdot 10^{-12};$$

$$\delta\alpha = \frac{2\pi}{360 \cdot 60} = 2{,}92 \cdot 10^{-4}\ \textit{рад} = 0{,}037\%$$

от диапазона поворота оси;

$$\Delta U_{\text{неч}} = \frac{0{,}885 \cdot 2\pi 400 \cdot 10^{6} \cdot 1 \cdot 58\,(4^2 - 1^2)\,2{,}92 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-12}}{1} = 7 \cdot 10^{-5}\ \textit{в}.$$

Коэффициент усиления усилителя составит:

$$k = \frac{1}{7 \cdot 10^{-5}} = 15\,000.$$

Таким образом, здесь могут быть применены усилители, описанные в гл. 5, схемы которых изображены на рис. 59 и 60.

4. Влияние линии связи на точность дистанционной передачи

Если емкостный датчик применен в дистанционной передаче, то датчик и указатель соединены между собой линией связи, длина которой достигает иногда нескольких десятков метров и более. При отладке и тарировке прибора в заводских условиях обычно невозможно предусмотреть длину линии связи, с которой будет эксплуатироваться прибор на практике. Поэтому тарировка прибора обычно производится с короткой линией связи, а погрешность, возникающая от увеличения длины линии, как правило, не учитывается. Однако известны случаи, когда увеличение длины линии связи на 1—2 *м* уже выводило прибор за пределы допусков, и по одной этой причине приборы браковались. Таким образом, необходимо всегда знать степень влияния длины линии на показания прибора, а также знать меры, которые необходимо принять для уменьшения этого влияния, если это необходимо.

Во избежание наводок провода, соединяющие отрабатывающий потенциометр, расположенный в указателе, и

емкостный датчик, расположенный в блоке датчика, должны быть экранированными, а экран заземлен. При этом емкости проводов могут достигать больших значений. В таблице приведены значения удельных емкостей (величина емкости 1 *м* провода) для различных марок экранированных проводов.

Марка провода	$C_{уд}$, *пф/м*	tg δ	Марка провода	$C_{уд}$, *пф/м*	tg δ
БПВЛЭ-0,35	160	0,08—0,1	БПТЭ-0,35	130	0,00
БПВЛЭ-0,5	200		БПТЭ-0,5	150	Для $f=$
БПВЛЭ-0,75	225	Для $f=$	БПТЭ-0,75	165	$=500$ *кгц*
БПВЛЭ-1,0	245	$=500$ *кгц*	БПТЭ-1,0	180	

Рассмотрим влияние паразитных емкостей соединительных проводов на точность показаний прибора с двухлучевым емкостным датчиком. Емкости проводов оказываются включенными параллельно плечам отрабатывающего потенциометра (рис. 4).

Составим выражение для относительной э. д. с., снимаемой с одного плеча потенциометра, при шунтировании обоих плеч потенциометра одинаковыми паразитными емкостями *C*:

$$\frac{u_1'}{u}=\frac{\dfrac{\dfrac{r}{Cp}}{r+\dfrac{1}{Cp}}}{\dfrac{\dfrac{r}{Cp}}{r+\dfrac{1}{Cp}}+\dfrac{\dfrac{(R-r)}{Cp}}{R-r+\dfrac{1}{Cp}}}=\frac{r\,[(R-r)\,Cp+1]}{2r\,(R-r)\,Cp+R}.$$

А относительная погрешность показаний окажется равной величине

$$\Delta=\frac{u_1'}{u}-\frac{u_1}{u}=\frac{u_1'}{u}-\frac{r}{R}=\frac{r\,(R^2-3Rr+2r^2)\,Cp}{R\,[2r\,(R-r)\,Cp+R]}.$$

Определим, в каких точках диапазона погрешность равна нулю:

$$r\,(R^2-3Rr+2r^2)\,Cp=0.$$

Уравнение имеет три корня:

$$r_1 = 0;\ r_2 = 0{,}5R;\ r_3 = R.$$

В этих точках погрешность полностью отсутствует.

В связи с тем, что раньше система была настроена на определенную фазу сигнала, и после увеличения длины линии система будет реагировать только на сигнал, имеющий ту же фазу. Поэтому и погрешность в показаниях будет давать только та часть дополнительного сигнала, которая имеет первоначальную фазу.

Положим $p = j\omega$ и найдем активную и реактивную части дополнительного сигнала:

$$\Delta(\omega) = \frac{r\,(R^2 - 3Rr + 2r^2)\,Cj\omega}{R\,[2r\,(R - r)\,Cj\omega + R]}.$$

Нас интересует только часть сигнала $Re\,[\Delta(\omega)]$:

$$\delta = Re\,[\Delta(\omega)] = \frac{2r^2\,(R - r)\,(R^2 - 3Rr + 2r^2)\,C^2\omega^2}{R\,[R^2 + 4r^2\,(R - r)^2\,C^2\omega^2]}.$$

Положив $\frac{r}{R} = \gamma$, получим:

$$\delta = \frac{2\gamma^2\,(1 - \gamma)\,(1 - 3\gamma + 2\gamma^2)\,R^2C^2\omega^2}{1 + 4\gamma^2\,(1 - \gamma)^2\,R^2C^2\omega^2}. \qquad (31)$$

По этой формуле может быть определена относительная погрешность показаний прибора в любой точке диапазона (γ) при емкости соединяющего провода C, сопротивлении потенциометра R и частоте питающего напряжения $f = \frac{\omega}{2\pi}$.

Если же к концам потенциометра подключены добавочные балластные сопротивления, то погрешность должна вычисляться по другой формуле:

$$\delta = \frac{2\gamma^2\,(\rho - \gamma)\,(\rho^2 3\rho\gamma + 2\gamma^2)\,R^2C\omega^2}{\rho\,[\rho^2 + 4\gamma^2\,(\rho - \gamma)^2\,R^2C^2\omega^2]},$$

где $\rho = \frac{R_п}{R}$;

$R_п$ — полное сопротивление цепи потенциометра, включая и балластные сопротивления.

Определим расположение максимума ошибки и ее величину в формуле (31), для чего приравняем нулю первую производную от δ.

Пренебрегая членом $4\gamma^2(1-\gamma)^2 R^2C^2\omega^2$ по сравнению с единицей, получим:

$$\delta' \approx [2\gamma^2(1-\gamma)(1-3\gamma+2\gamma^2)R^2C^2\omega^2] = \\ = 2R^2C^2\omega^2(5\gamma^4-10\gamma^3+6\gamma^2-\gamma)=0,$$

или

$$5\gamma^4-10\gamma^3+6\gamma^2-\gamma=0,$$

откуда

$$\gamma_1=0;\ \gamma_3=0{,}5+\sqrt{0{,}05}\approx 0{,}724;$$
$$\gamma_2=1;\ \gamma_4=0{,}5-\sqrt{0{,}05}\approx 0{,}276.$$

Первые два корня значения максимума не дают, третий и четвертый корни указывают расположение максимумов ошибки, которая равна:

$$\delta_{\text{макс}}=\pm\frac{0{,}0175\,(RC\omega)^2}{1+0{,}16\,(RC\omega)^2}, \qquad (32)$$

где знак „плюс" справедлив для четвертого корня (нижняя половина потенциометра), а знак „минус" — для третьего корня (верхняя половина потенциометра).

Пример. Рассчитать максимальную погрешность показаний при увеличении длины соединительной линии на 40 *м*. Марка провода БПВЛЭ-0,35. Частота питания 400 *гц*. Сопротивление потенциометра 5 *ком*. Балластных сопротивлений нет.

По таблице определяем емкость провода:

$$C=l_{\text{пр}}C_{\text{уд}}=40\cdot160=6\,400\ \text{пф}.$$

Максимальная погрешность составит:

$$\delta_{\text{макс}}=\frac{0{,}0175\,(5\cdot10^3\cdot6{,}4\cdot10^{-9}\cdot2\,500)^2}{1+0{,}16\,(5\cdot10^3\cdot6{,}4\cdot10^{-9}\cdot2\,500)^2}= \\ =1{,}12\cdot10^{-4}\approx0{,}01\%\ \text{от диапазона}.$$

Если в результате расчета оказывается, что эта погрешность недопустимо велика, можно рекомендовать следующие пути снижения погрешности:

1) уменьшение величины сопротивления цепи отрабатывающего потенциометра;

2) выбор соединительных проводов с малой удельной емкостью (например, коаксиальных кабелей);

3) предварительный учет части длины линии при тарировке прибора.

Помимо шкаловой погрешности, влияние длины соединительной линии сказывается еще и в том, что схема перестает быть чисто нулевой схемой, так как во всех точках диапазона (кроме $\gamma=0$, 0,5; 1,0) имеется еще мнимая (квадратичная) составляющая сигнала $I_m\ [\Delta(\omega)]$ (составляющая сигнала, сдвинутая на 90° относительно полезного сигнала), которая не компенсируется следящей системой. Эта часть сигнала меняется при прохождении диапазона и ее можно просмотреть на осциллографе в установившемся состоянии следящей системы. Эта составляющая вредна, так как забивает тракт усилителя и делает показания зависимыми от внешних условий (параметры питания, температура и пр.).

Глава третья

ТРЕХЛУЧЕВЫЕ ЕМКОСТНЫЕ ДАТЧИКИ

1. Описание и расчет

Наряду с двухлучевыми датчиками к емкостным дифференциальным датчикам должен быть отнесен и трехлучевой датчик (см. [Л. 11—14]).

Статор трехлучевого датчика состоит из трех пластин, к которым подводятся напряжения от статора сельсина, ротор которого питается от сети (рис. 24). Ротор трехлучевого датчика имеет специальную форму.

Сигнал с ротора подается в усилитель. Отрабатывающий двигатель вращает ротор сельсина в сторону погашения рассогласования. При этом емкостный датчик может быть выполнен как без электрической редукции (когда одному обороту ротора датчика будет соответствовать один оборот ротора отрабатывающего сельсина), так и с электрической редукцией (когда одному обороту оси ротора емкостного датчика будет соответствовать n оборотов ротора отрабатывающего сельсина, где n — число редукции).

Конструктивно трехлучевой датчик может быть сделан цилиндрическим или плоским. В цилиндрическом датчике, изображенном на рис. 25, статор представляет собой полый цилиндр из изолирующего материала, на внутреннюю поверхность которого нанесены металлические пластины, соединенные между собой через две на третью и образующие, таким образом, три группы. Ротором является металлический цилиндр, вставленный в статор. По образующей рото-

ра выфрезерована синусоида, число периодов которой равно числу электрической редукции. Число пластин статора равно либо $3n$, либо $^3/_2\,n$.

В плоском датчике (рис. 26) пластины статора расположены в одной плоскости. Ротор выполнен в виде фигурной пластины и располагается над статором параллельно ему. Число пластин и соединение их в плоском датчике то же, что и в цилиндрическом.

По принципу работы емкостный датчик должен быть отнесен к датчикам с переменной S. По своему действию трехлучевой датчик аналогичен сельсину, и все включения,

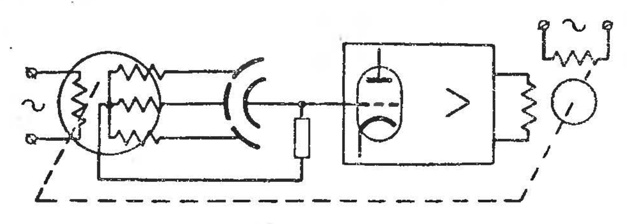


Рис. 24. Трехлучевая емкостная следящая система.

пригодные для сельсина, справедливы и для трехлучевого емкостного датчика.

Для правильной работы системы с емкостным трехлучевым датчиком необходимо, чтобы емкости между каждой группой статорных пластин и ротором были соответственно равны:

$$\left.\begin{aligned} &C_1 = C_0 + C_m \sin\psi \text{ — для I группы;}\\ &C_2 = C_0 + C_m \sin\left(\psi + \frac{2}{3}\pi\right) \text{ — для II группы;}\\ &C_3 = C_0 + C_m \sin\left(\psi + \frac{4}{3}\pi\right) \text{ — для III группы;}\\ &\psi = n\alpha, \end{aligned}\right\} \qquad (33)$$

где C_0 — постоянная составляющая емкости;
C_m — переменная составляющая емкости;
n — число электрической редукции;
α — угол поворота ротора емкостного датчика относительно его статора.

Ротор сельсина питается переменным напряжением; с сопротивления $R_н$ снимается управляющий сигнал, поступающий затем в усилитель.

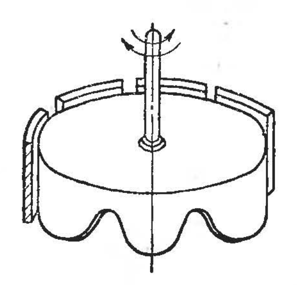


Рис. 25. Цилиндрический емкостный трехлучевой датчик.

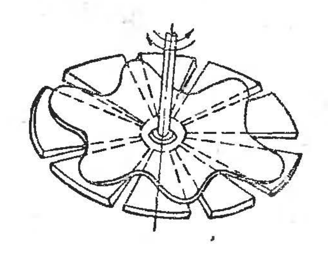


Рис. 26. Плоский емкостный трехлучевой датчик.

Напряжения, трансформируемые на статор сельсина, соответственно равны:

$$\left.\begin{aligned} e_1 &= e_р k \cos\theta; \\ e_2 &= e_р k \cos\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right); \\ e_3 &= e_р k \cos\left(\theta + \frac{4}{3}\pi\right); \\ e_р &= e_m \sin\omega t, \end{aligned}\right\} \qquad (34)$$

где ω — частота питающего напряжения;

k — коэффициент трансформации;

θ — угол поворота ротора сельсина относительно его статора.

Эквивалентная схема емкостной дистанционной передачи изображена на рис. 27.

Уравнения схемы имеют вид:

$$\left.\begin{aligned} \frac{1}{C_1 p} i_1 + R_н (i_1 + i_2 + i_3) &= e_1; \\ \frac{1}{C_2 p} i_2 + R_н (i_1 + i_2 + i_3) &= e_2; \\ \frac{1}{C_3 p} i_3 + R_н (i_1 + i_2 + i_3) &= e_3, \end{aligned}\right\} \qquad (35)$$

где p — знак оператора.

Решая систему уравнений (35), получим:

$$U_R = \frac{(e_1 C_1 + e_2 C_2 + e_3 C_3) R_н p}{(C_1 + C_2 + C_3) R_н p + 1}, \qquad (36)$$

Существующие типы сельсинов не имеют вывода средней точки, поэтому ее необходимо искусственно создать.

Так как $e_1+e_2+e_3=0$, то при $C_1=C_2=C_3=C$ $U_R=0$.

Следовательно, имеется возможность создания искусственной средней точки из одинаковых емкостей. Среднюю

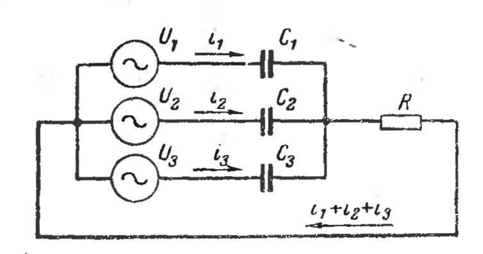


Рис. 27. Эквивалентиая схема емкостной трехлучевой днстанционной передачи.

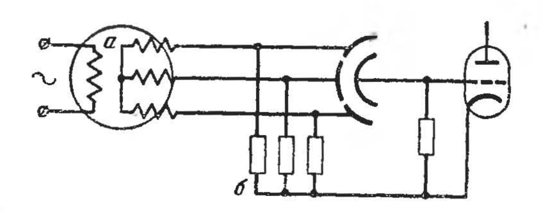


Рис. 28. Схема включения трехлучевого емкостного датчика со средней точкой.

точку можно создать и из одинаковых сопротивлений. Тогда схема приобретает вид, приведенный на рис. 28.

Находим U_R:

$$U_R=\frac{(e_1C_1+e_2C_2+e_3C_3)\,R_{\text{н}}p}{(C_1+C_2+C_3)\,R_{\text{н}}+1}=\frac{e_{\text{р}}kR_{\text{н}}p}{3C_0R_{\text{н}}p+1}\times$$

$$\times\left\{\cos\theta\,(C_0+C_m\sin\psi)+\cos\left(\theta+\frac{2}{3}\pi\right)\times\right.$$

$$\times\left[C_0+C_m\sin\left(\psi+\frac{2}{3}\pi\right)\right]+\cos\left(\theta+\frac{4}{3}\pi\right)\times$$

$$\left.\times\left[C_0+C_m\sin\left(\psi+\frac{4}{3}\pi\right)\right]\right\}.$$

Заменяя $p=j\omega$, получим окончательно:

$$u_R=\frac{1{,}5\, e_{\text{р}} k C_m R_{\text{н}} \omega}{\sqrt{9C_0^2\, R_{\text{н}}^2\, \omega^2+1}} \sin(\omega t+\varphi)\sin(n\alpha-\theta), \qquad (37)$$

где $\varphi=\operatorname{arctg}\frac{1}{3C_{\text{р}}R_{\text{н}}\omega}$.

Из формулы (37) следует, что емкостный датчик с зависимостями (33) подобен сельсину, а вся схема — схеме сельсин-трансформатора. При этом получается, что в установившемся режиме напряжение на сопротивлении $R_{\text{н}}$ — $U_R=0$; следовательно, показания системы не зависят от изменения напряжения и частоты (при условии отсутствия наводок в схеме).

Из формулы следует, что при равенстве между собой сопротивлений звезды угол поворота оси ротора сельсина на выходе дистанционной передачи пропорционален углу поворота оси ротора датчика на входе дистанционной передачи и больше него в n раз, где n — число электрической редукции датчика.

Рассмотрим проявления механических сил в трехлучевом датчике.

Для емкостного трехлучевого датчика выражение для механической силы приобретает следующий вид:

$$F=\frac{\partial W}{\partial \alpha}=\frac{\partial}{\partial \alpha}\sum_{i=1}^{3}\frac{U_i^2}{2}C_i.$$

Определим механическую силу:

$$F=\frac{U_1^2\partial C_1}{2\partial\alpha}+\frac{U_2^2\partial C_2}{2\partial\alpha}+\frac{U_3^2\partial C_3}{2\partial\alpha}=$$

$$+\frac{U^2nC_m}{2}\left[\cos^2\theta\cos\alpha+\cos^2\left(\theta+\frac{2}{3}\pi\right)\cos\left(n\alpha+\frac{2}{3}\pi\right)+\right.$$

$$\left.+\cos^2\left(\theta+\frac{4}{3}\pi\right)\cos\left(n\alpha+\frac{4}{3}\pi\right)\right]=0. \qquad (38)$$

Механическая сила, возникающая от напряжения на емкости, при любом положении ротора трехлучевого датчика относительно его статора, равна нулю.

Трехлучевой датчик является датчиком с переменной S и постоянным d. Емкости между группами пластин и ро-

тором пропорциональны их площадям перекрытия (если пренебречь краевыми эффектами):

$$C_1 \equiv S_1;$$
$$C_2 \equiv S_2;$$
$$C_3 \equiv S_3.$$

Определим характер кривой ротора для цилиндрического датчика:

$$S = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} f(\alpha)\, d\alpha,$$

поэтому

$$f(\alpha) = \frac{dS}{d\alpha}. \tag{39}$$

Для I группы пластин

$$f_1(\alpha) = \frac{dS_1}{d\alpha} = nRh \cos n\alpha;$$

для II группы пластин

$$f_2(\alpha) = \frac{dS_2}{d\alpha} = nRh \cos (n\alpha + {}^2/_3\pi);$$

для III группы пластин

$$f_3(\alpha) = \frac{dS_3}{d\alpha} = nRh \cos (n\alpha + {}^4/_3\pi).$$

Следовательно, для обеспечения зависимостей (33) образующая ротора должна иметь синусоидальный характер, статорные пластины должны быть расположены равномерно по окружности и иметь равную ширину.

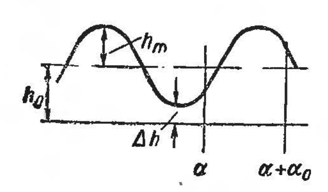


Рис. 29. Определение ширины пластины статора.

Определим наивыгоднейшую площадь статорных пластин.

Обозначим через α_0 угол, занимаемый пластиной статора.

Для получения наибольшего сигнала необходимо, чтобы C_m было возможно больше, а C_0 — возможно меньше. Определим ширину одной пластины (рис. 29):

$$S = R \int_{\alpha}^{\alpha+\alpha_0} (h_0 + h_m \sin n\alpha)\, d\alpha = S_0 + S_m \sin (n\alpha + \psi_0).$$

где n — число электрической редукции;
R — радиус ротора датчика.

$$S = R\int\limits_{\alpha}^{\alpha+\alpha_0} h_0 d\alpha + R\int\limits_{\alpha}^{\alpha+\alpha_0} h_m \sin n\alpha\, d\alpha;$$

$$S = Rh_0\alpha_0 + 2R\frac{h_m}{n}\sin\left(n\alpha - \frac{n\alpha_0}{2}\right)\sin\frac{n\alpha_0}{2}.$$

Очевидно, что

$$S_0 = Rh_0\alpha_0; \qquad (40)$$

$$S_m = 2R\frac{h_m}{n}\sin\frac{n\alpha_0}{2}; \qquad (41)$$

S_m имеет максимум при $\sin\frac{n\alpha_0}{2} = 1$, или

$$\alpha_0 = \frac{\pi}{n}. \qquad (42)$$

Электрическая редукция может быть получена двумя способами:

1) путем увеличения количества пластин статора и соответственно числа периодов синусоиды ротора;

2) путем увеличения только числа периодов синусоиды ротора.

Во втором случае могут быть получены только числа, не кратные трем, так как иначе ротор становится симметричным статору, и снимаемый сигнал равен нулю. Обычно вторым способом поднимают редукцию в 2 раза, устанавливая соотношение пластин статора и периодов синусоиды ротора равным $^3/_2$. Дальнейшее увеличение редукции за счет только числа периодов синусоиды ротора приводит к заметному уменьшению амплитуды выходного сигнала.

При получении редукции по первому способу нельзя разместить необходимое число пластин с шириной $\alpha_0 = \frac{\pi}{n}$, поэтому $\alpha_0 = {}^2/_3\frac{\pi}{n}$, а $S_m = \frac{\sqrt{3}Rh_m}{h}$. Во втором случае это сделать можно, поэтому $S_m = 2R\frac{h_m}{n}$.

Нужно отметить, что $h_0 > h_m$, так как $S_0 + S_m\sin\psi > 0$. Разность $\Delta h = h_0 - h_m$ определяется из конструктивных соображений, причем с увеличением Δh растет C_0, и полезный сигнал уменьшается, хотя и очень незначительно.

Пример. Определим геометрические размеры ротора емкостного трехлучевого датчика и коэффициент усиления системы.

Наружный диаметр статора	$D_н = 50$ *мм*
Высота статора	$H_{ст} = 18$ *мм*
Угол поворота ротора	$\alpha_m = 30°$
Зазор между статором и ротором	$d = 0,4$ *мм*
Сопротивление утечки сетки первого каскада	$R_c = 1,0$ *Мом*
Линейное напряжение статора отрабатывающего сельсина	$e_л = 16$ *в*
Допустимая нечувствительность системы	$\delta\alpha = 20''$

Для того чтобы система не выпала из синхронизма, нужно чтобы при полном угле поворота ротора датчика электрический угол не превышал 180°. Из этого условия определяем редукцию:

$$\left.\begin{aligned} n &= \frac{180}{\alpha_m}; \\ n &= \frac{180}{30} = 6. \end{aligned}\right\} \qquad (43)$$

Принимаем: ротор содержит шесть периодов синусоиды, статор — девять пластин, соединенных в три группы по три пластины.

Определим геометрические размеры ротора.

Примем толщину стенки статора $b_{ст} = 3$ *мм*.

Диаметр ротора равен:

$$D_р = D_{ст} - 2b_{ст} - 2a = 50 - 2\cdot3 - 2\cdot0,4 = 44,2 \quad мм. \qquad (44)$$

Высота ротора

$$H_р \leqslant H_{ст} - b; \qquad (45)$$

$$H_р \leqslant 15 \ мм.$$

Положим:

$$H_р = h_0 + h_m = 14 \ мм; \ \Delta h = h_0 - h_m = 1 \ мм.$$

Найдем:

$$h_0 = 7,5 \ мм; \ h_m = 6,5 \ мм.$$

Угол, занимаемый пластиной статора:

$$\alpha_0 = \frac{\pi}{n} = \frac{\pi}{6} \ рад = 30°.$$

Определим S_0 и S_m:

$$S_0 = Rh_0 \frac{\pi}{n} = \frac{44,2\cdot7,5\pi}{2\cdot6} = 38 \ мм^2 = 0,38 \ см^2;$$

$$S_m = 2R \frac{h_m}{n} = \frac{2\cdot6,5\cdot44,2}{6\cdot2} = 48 \ мм^2 = 0,48 \ см^2.$$

Так как в каждой группе статора по три пластины, емкости C_0 и C_m соответственно равны:

$$C_0 = 0,885\frac{mS_0}{d} = \frac{3\cdot 0,38\cdot 0,885}{0,4} = 2,5\ пф;$$

$$C_m = 0,885\ \frac{mS_m}{d} = \frac{0,885\cdot 3\cdot 0,48}{1,13\cdot 0,4} = 3,2\ пф.$$

Пороговый сигнал ($U_p k = 16\ в$)

$$\Delta U_R = \frac{1,5\cdot 16\cdot 10^6\cdot 3,2\cdot 10^{-12}\cdot 2\pi 400}{\sqrt{9\cdot 10^{12}\cdot 3,2^2\cdot 10^{-24}\cdot 4\pi^2\cdot 400^2 + 1}}\sin 6\cdot 20'' =$$

$$= \frac{0,192}{\sqrt{5,8\cdot 10^{-4} + 1}}\ 5,56\cdot 10^{-4} = 1,07\cdot 10^{-4}\ в.$$

Коэффициент усиления усилителя

$$k = \frac{U_{тр}}{\Delta U_R} = \frac{1}{1,07\cdot 10^{-4}} = \frac{1}{1,07\cdot 10^{-4}} = 9,4\cdot 10^3 = 9\,400.$$

Таким образом, здесь, как и в предыдущих схемах, могут быть применены усилители, схемы которых изображены на рис. 59 и 60.

Определим форму кривой для роторной пластины плоского датчика. Требуется найти зависимость $\rho = f(\alpha)$ в полярных координатах, где ρ — текущий радиус, α—текущий угол кривой, огибающей пластину ротора.

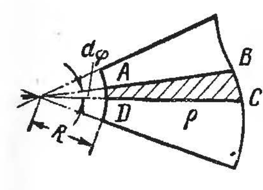


Рис. 30. Определение формы ротора плоского датчика.

Пластина статора представляет собой сектор, ограниченный двумя радиусами и двумя концентрическими окружностями (рис. 30). Пластина ротора ограничена определяемой кривой.

Найдем площадь dS перекрытия пластин статора пластиной ротора на угол $d\alpha$ (четырехугольник $ABCD$):

$$dS = \frac{1}{2}\rho^2 d\alpha - \frac{1}{2}R^2 d\alpha, \qquad (46)$$

а полная площадь перекрытия одной пластины равна:

$$S = \int\limits_{\alpha}^{\alpha+\alpha_0} \frac{1}{2}(\rho^2 - R^2)\, d\alpha, \qquad (47)$$

где α_0 — угол, занимаемый пластиной статора.

Положим:

$$\rho^2 = \rho_1^2 + \rho_2^2 \cos^2 \frac{n\alpha}{2}, \qquad (48)$$

тогда

$$S=\int\limits_{\alpha}^{\alpha+\alpha_0}\frac{1}{2}(\rho_1^2+\rho_2^2\cos\frac{n\alpha}{2}-R^2)\,d\alpha=$$

$$=\frac{1}{2}(\rho_1^2+\frac{1}{2}\rho_2^2-R^2)\alpha_0+\frac{1}{2n}\rho_2^2\sin\left(\frac{\pi}{2}+\frac{n\alpha_0}{2}+n\alpha\right)\sin\frac{n\alpha_0}{2}=$$

$$=S_0+S_m\sin(n\alpha+\psi_0).$$

Очевидно, в этом случае

$$S_0=\frac{1}{2}\alpha_0(\rho_1^2+\frac{1}{2}\rho_2^2-R^2), \tag{49}$$

$$S_m=\frac{1}{2}\rho_2^2\sin\frac{n\alpha_0}{2}. \tag{50}$$

S_m имеет максимум при $\sin\frac{n\alpha_0}{2}=1$, или

$$\alpha_0=\frac{\pi}{n}. \tag{51}$$

Обозначим число статорных пластин в группе через m.

Так же как и для цилиндрического датчика в случае получения редукции за счет статорных пластин,

$$\alpha_0=\frac{2}{3}\cdot\frac{\pi}{n},$$

тогда

$$\left.\begin{aligned}S_0&=\frac{\pi}{3n}(\rho_1^2+\frac{1}{2}\rho_2^2-R^2)m;\\ S_m&=\frac{1}{2}\rho_2^2\sin\frac{\pi\cdot m}{3}.\end{aligned}\right\} \tag{52}$$

В случае увеличения редукции за счет числа периодов ротора и $\alpha_0=\frac{\pi}{n}$:

$$S_0=\frac{\pi}{2n}(\rho_1^2+\frac{1}{2}\rho_2^2-R^2)m; \tag{53}$$

$$S_m=\frac{1}{2}\rho_2^2 m. \tag{54}$$

Таким образом, окончательная формула, определяющая форму кривой ротора, имеет вид:

$$\rho=\sqrt{\rho_1^2+\rho_2^2\cos^2\frac{n\alpha}{2}}. \tag{55}$$

* Вывод формулы (55) в основном аналогичен приведенному в [Л. 11] и [Л. 14].

Пример. Рассчитать плоский емкостной трехлучевой датчик со следующими параметрами:

Наружный диаметр . . . . $D_н = 60$ *мм*
Внутренний диаметр . . . . $D_{вн} = 10$ *мм*
Зазор между статором и ротором . . . . . . $d = 0{,}5$ *мм*
Линейное напряжение сельсина . . . . $U_л = 58$ *в*
Частота питающего напряжения . . . . . . $f = 400$ *гц*
Допустимая нечувствительность . . . . . . $\delta\alpha = 30$
Число редукций . . . . $n_1 = 2$
$n_2 = 3$

Положим:

$$\rho_{мин} = \rho_1 = 13 \text{ мм}; \quad \sqrt{\rho_1^2 + \rho_2^2} = \rho_{макс} = 28 \text{ мм}.$$

Определим:

$$\rho_2 = \sqrt{\rho_{макс}^2 - \rho_1^2} = \sqrt{28^2 - 13^2} = 24{,}8 \text{ мм}.$$

1-й случай: $n = 2$.

Построим функцию профиля ротора

$$\rho = \sqrt{13^2 + 24{,}8^2 \cos^2\alpha} = \sqrt{169 + 615 \cos^2\alpha}.$$

α	0	±10°	±20°	±30°	±40°	±50°	±60°
ρ	28	27,7	26,6	25,1	23,0	20,6	17,9

α	±70°	±80°	±90°	±100°	±110°	±120°	±130°
ρ	15,5	13,7	13	13,7	15,5	17,9	20,6

α	±140°	±150°	±160°	±170°	±180°
ρ	23,0	25,1	26,6	27,7	28

Чертеж датчика приведен на рис. 31.

По формуле (53):

$$S_0 = \frac{\pi}{2\cdot 2}\left(13^2 + \frac{1}{2}24{,}8^2 - 10^2\right) = 538 \text{ мм}^2 = 5{,}38 \text{ см}^2;$$

$$S_m = \frac{1}{2}24{,}8^2\cdot 1 = 308 \text{ мм}^2 = 3{,}08 \text{ см}^2;$$

$$C_0 = \frac{0{,}885\cdot 5{,}38}{0{,}5} = 9{,}5 \text{ пф};$$

$$C_m = \frac{0{,}885\cdot 3{,}08}{0{,}5} = 5{,}45 \text{ пф}.$$

$$\Delta U_R = \frac{1{,}5\cdot 58\cdot 10^6\cdot 5{,}45\cdot 10^{-12}\cdot 2\cdot 400\cdot 1{,}39\cdot 10^{-4}}{\sqrt{9\cdot 10^{12}\cdot 9{,}5^2\cdot 10^{-24}\cdot 4^2\cdot 400^2 + 1}} = \frac{1{,}67\cdot 10^{-4}}{\sqrt{5{,}1\cdot 10^{-8} + 1}} = 1{,}66\cdot 10^{-4} \text{ в}.$$

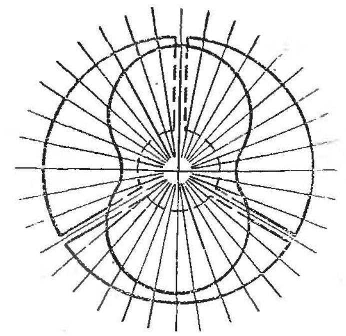


Рис. 31. Плоский датчик с редукцией, равной двум.

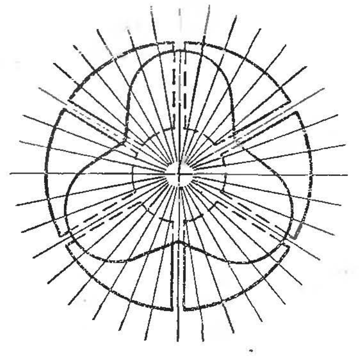


Рис. 32. Плоский датчик с редукцией, равной трем.

Коэффициент усиления усилителя

$$k = \frac{1}{1{,}66 \cdot 10^{-4}} = 6 \cdot 10^3.$$

2-й случай $n = 3$.

Построим функцию профиля ротора

$$\rho = \sqrt{13^2 + 24{,}8^2 \cos^2 {}^3/_2\, \alpha} = \sqrt{169 + 615 \cos^2 {}^3/_2\, \alpha}.$$

α	0	$\pm 10°$	$\pm 20°$	$\pm 30°$	$\pm 40°$	$\pm 50°$
ρ	28	27,2	25,1	21,8	18,3	15,2
α	$\pm 60°$	$\pm 70°$	$\pm 80°$	$\pm 90°$	$\pm 100°$	$\pm 110°$
ρ	13	15,2	18,3	21,8	25,1	27,2

α	$\pm 120°$	$\pm 130°$	$\pm 140°$	$\pm 150°$	$\pm 160°$	$\pm 170°$	$\pm 180°$
ρ	28	27,2	25,1	21,8	18,3	15,2	13

Чертеж датчика приведен на рис. 32.

По формуле (52) ($m = n$):

$$S_0 = \frac{\pi}{2}\left(13^2 + \frac{1}{2}\, 24{,}8^2 - 10^2\right) = 875\ мм^2 = 8{,}75\ см^2;$$

$$S_m = \frac{\pi}{2}\, 24{,}8^2 \sin\frac{\pi}{3} = 835\ мм^2 = 8{,}35 см^2;$$

$$C_0 = \frac{0{,}885 \cdot 8{,}75}{0{,}5} = 15{,}5\ пф;$$

$$C_m = \frac{0{,}885 \cdot 8{,}35}{0{,}5} = 14{,}9\ пф.$$

$$\Delta U_R = \frac{1,5\cdot 58\cdot 10^6\cdot 14,9\cdot 10^{-12}\cdot 2\pi\cdot 400\cdot 1,39\cdot 10^{-4}}{\sqrt{9\cdot 10^{12}\cdot 15,5^2\cdot 10^{-24}\cdot 4\pi^2\cdot 400^2+1}} = 4,5\cdot 10^{-4}\ \textit{в};$$

$$k = \frac{1}{4,55\cdot 10^{-4}} = 2,2\cdot 10^8.$$

Усилители, пригодные для схем с рассчитанными выше датчиками, описаны в гл. 5.

В ряде случаев необходимо использовать емкостные датчики с большой редукцией, достигающей нескольких десятков. Такая задача возникает, например, тогда, когда мы располагаем небольшим перемещением чувствительного элемента, и ротор емкостного датчика поворачивается на небольшой угол, в то время как стрелка указателя должна повернуться на значительный угол.

При большой редукции емкостного датчика становится затруднительным изготовить ротор с синусоидальной формой зубьев. Кроме того, здесь уже сильно сказываются краевые эффекты, искажающие поле.

В этом случае целесообразно выполнить конструкцию следующим образом.

В статор запрессовываются узкие пластины, число которых определено числом редукции, так же как и в трехлучевых датчиках с небольшим числом редукции. Каждая пластина имеет ласточкин хвост, который способствует удержанию пластины в пластмассе. Статор изготавливается следующим образом. Сначала вытачивается заготовка в виде кольца, лучше всего из латуни. Чертеж заготовки изображен на рис. 33,*а*. Изоляционные промежутки на статоре следует делать не менее 0,5 *мм*. После запрессовывания кольца в пластмассу статор растачивается изнутри и снаружи. Чертеж статора изображен на рис.33,*б*. Снаружи протачиваются три круговые канавки, в которых располагается провод, соединяющий пластины статора между собой через две на третью, образуя три группы пластин.

Ротор представляет собой круглый дюралюминиевый цилиндр с выфрезерованными на нем пазами (рис. 33,*в*). Пазы ротора имеют прямоугольную форму и располагаются равномерно по окружности. При отношении числа роторных зубьев к числу статорных пластин, равному $^1/_3$, ширину паза следует делать равной примерно $2b_{из}+b_м$, где $b_{из}$ — ширина изоляции между пластинами статора, $b_м$ — ширина металлической пластины статора, а при отношении $^2/_3$ ширина паза будет равна $0,5\,b_{из}+0,5\,b_м$.

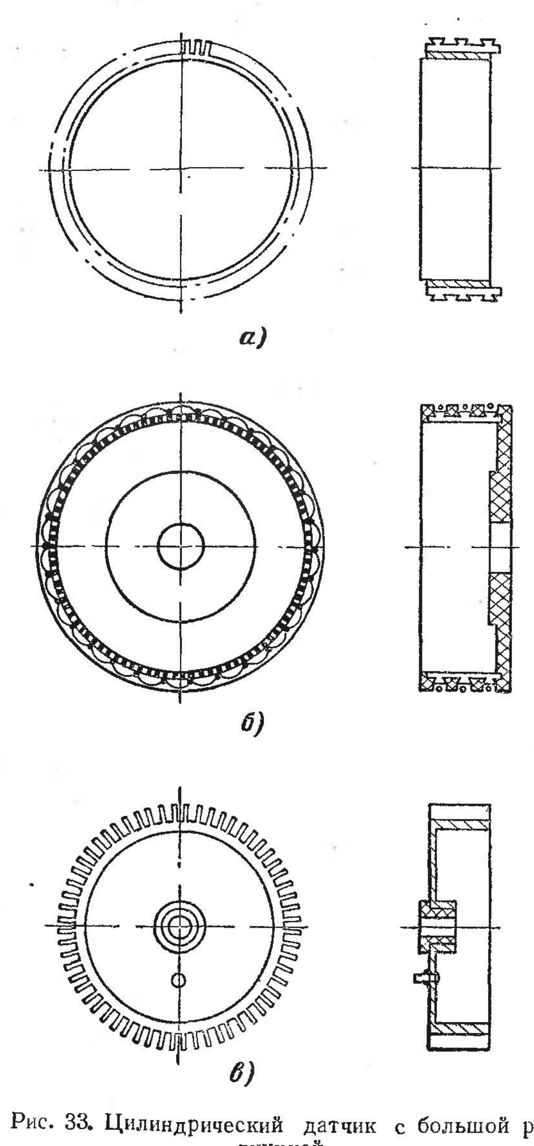


Рис. 33. Цилиндрический датчик с большой редукцией.

Таким способом можно получить редукцию примерно от 20 до 100. Для получения коэффициента редукции больше 100 нужно применять специальную технологию.

2. Исправление нелинейностей в следящей системе с трехлучевым датчиком

Исправление нелинейностей в системе с трехлучевым датчиком путем изменения электрических параметров системы возможно при работе системы в пределах 180° эл. Регулировка системы под заданную нелинейность производится путем изменения соотношений сопротивлений звезды.

Как известно, поле, пульсирующее в пространстве, можно разложить на два вращающихся поля — прямой последовательности и обратной последовательности. Можно считать, что эти поля создаются каждое своей системой трехфазного напряжения. Векторная диаграмма одной из этих систем построена на рис. 34.

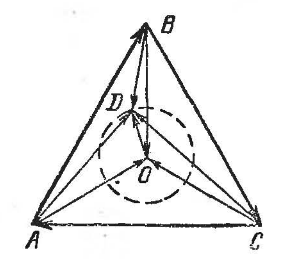


Рис. 34. Векторная диаграмма трехлучевой системы.

Здесь *AB*, *BC* и *CA* — векторы напряжений, наводимых в статоре сельсина со стороны ротора; *AD*, *BD* и *CD* — падение напряжений на трех емкостях датчика; *AO*, *BO* и *CO* — падение напряжений на сопротивлениях звезды; *OD* — напряжения на сопротивлении $R_н$ схемы.

При повороте ротора емкостного датчика точка *D* перемещается по окружности, центр которой совмещен с центром треугольника *ABC*. При этом электрический угол поворота ротора емкостного датчика равен длине дуги этой окружности.

Точка *O* звезды совмещена с центром треугольника *ABC* в том случае, когда все три сопротивления звезды в точности равны между собой. При этом угол, проходимый вектором *OD*, равен углу поворота ротора сельсина. Если же сопротивления звезды не равны между собой, точка *O* смещается относительно центра треугольника на некоторую величину *a* (рис. 35), тогда угол поворота сельсина будет равен углу *CAB*.

В этом случае напряжение на сопротивлении изобразится вектором AB. При вращении ротора датчика точка B перемещается по окружности, при вращении же ротора сельсина вращается вся векторная диаграмма системы; при этом действительный сигнал на сопротивлении $R_н$ будет равен проекции вектора AB на некоторую неподвижную ось, изображающую положение ротора сельсина. Установившееся положение системы наступит тогда, когда проекция этого вектора на ось положения сельсина станет равной нулю. Таким образом, при перемещении точки B

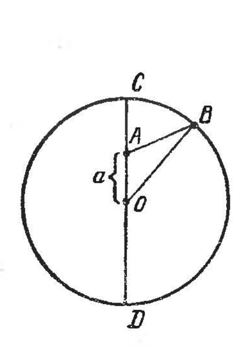


Рис. 35. Смещение звезды.

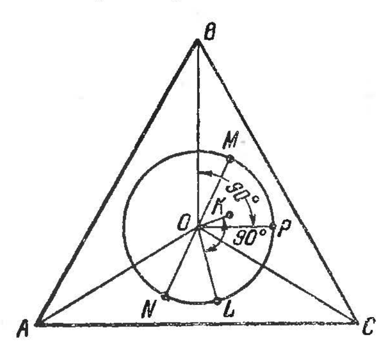


Рис. 36. Векторная диаграмма скомпенсированной системы.

по окружности при повороте ротора емкостного датчика на угол COB отрабатывающий двигатель разворачивает ротор сельсина на угол CAB.

Определим зависимость между электрическими углами поворота ротора датчика и ротора сельсина:

$\angle COB = \psi$ — угол поворота ротора датчика;

$\angle CAB = \theta$ — угол поворота ротора сельсина.

Из треугольника AOB находим:

$$\frac{AO}{\sin \angle ABO} = \frac{OB}{\sin \angle OAB};$$

$$\angle OAB = 180^\circ - \theta;$$

$$\angle ABO = 180^\circ - (180^\circ - \theta) - \psi = \theta - \psi;$$

$$\frac{AO}{\sin(\theta - \psi)} = \frac{OB}{\sin(180^\circ - \theta)} = \frac{OB}{\sin\theta}.$$

Окончательно

$$\theta - \psi = \arcsin\frac{a}{r}\sin\theta, \qquad (56)$$

Таким образом, погрешность приобретает арксинусоидальную зависимость. Такая зависимость позволяет компенсировать довольно разнообразные нелинейности при условии, что окончательная регулировка производится механическим корректором, выбирающим около 2% погрешности и при условии, что ротор датчика поворачивается на всем диапазоне на угол, равный 180° эл.

Составим методику корректирования погрешности от нелинейности поворота оси ротора датчика.

Рассмотрим векторную диаграмму рис. 36.

Здесь AO, BO и CO — напряжения на сопротивлении звезды, точка M — начальная точка угла поворота ротора датчика, точка N — конечная точка угла поворота ротора датчика, точка K — положение средней точки звезды, при которой имелась бы такая же погрешность, как от нелинейности входных звеньев. Задача заключается в том, чтобы определить положение этой точки K, т. е. узнать длину и положение вектора OK и компенсировать его, смещая точку O' в противоположную сторону.

Определим имеющуюся погрешность системы. Для этого установим угол поворота ротора датчика равным 180° эл. После этого определим функцию $\theta - \psi = f(\psi)$ и построим эту зависимость. Эта зависимость приближенно является преобразованной зависимостью от (56), ее выражением служит формула

$$\theta - \psi = \operatorname{arctg} \frac{\sin \psi}{\cos \psi - \frac{a}{r}} - \psi. \tag{57}$$

Для удобства считаем, что ротор датчика поворачивается равномерно, а нелинейности обусловлены смещением средней точки.

Определим положение максимума погрешности:

$$(\theta - \psi)'_\theta = (\arcsin \frac{a}{r} \sin \theta)' = 0.$$

Так как $\frac{a}{r} < 1$, решение единственное:

$$\cos \theta = 0; \ \theta = \frac{\pi}{2}.$$

Это значит, что максимум ошибки сдвинут на угол 90° от направления вектора OK и лежит в точке L.

Найдем положение векторов AO, BO и CO относительно начала отсчета.

Закоротим одно из сопротивлений, тогда центр звезды переместится в вершину треугольника (например, в точку B), и указатель отработает это положение, встав под углом 90° к направлению BO — в точку P. Отсюда определяются направления всех векторов: AO, BO и CO.

Необходимо отметить, что нас, как правило, интересует исправление характеристики не угла поворота ротора датчика, а входной величины, с которой угол поворота датчика связан функционально. Это обстоятельство сути дела

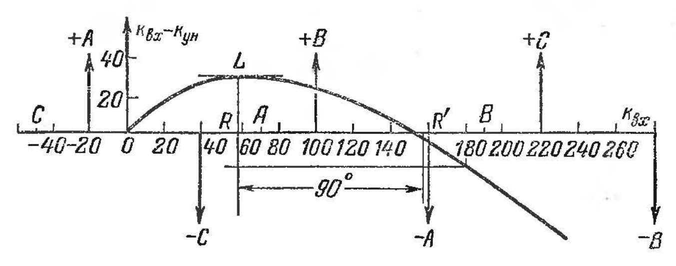


Рис. 37. График ошибки следящей трехлучевой системы.

не меняет, можно непосредственно компенсировать нелинейности входной величины.

Таким образом, методика устранения погрешности заключается в следующем:

1. Путем подбора передаточного отношения на входе датчика установить угол поворота ротора емкостного датчика равным 180° эл. при полном изменении входной величины перемещения. Например, при электрической редукции, равной шести, угол поворота ротора емкостного датчика надо установить равным 30°.

2. Снять погрешность и построить график $k_{вх} - k_{ук} = f(k_{вх})$ (рис. 37), где $k_{вх}$ — перемещение входной величины, а $k_{ук}$ — перемещение стрелки указателя.

3. Определить положение максимума погрешности на этом графике (точка L).

4. Отложить от этой точки в обе стороны по 90° эл. и от пересечения вертикальной линии, проведенной через эти засечки, с графиком ошибки в точке R' провести горизонтальную линию. Ошибкой является расстояние LR от точки L до этой линии.

5. Закоротить одно из сопротивлений звезды и определить положение указателя. Подгоняя $k_{вх}$ в эту же точку, добиться такого положения, чтобы при изменении этого сопротивления стрелка указателя оставалась неподвижной. Отметить это положение на графике (точка A).

Выведем сопротивление A и закоротим поочередно сопротивления B и C. При этом в одном случае система пойдет вправо, в другом — влево. От точки A отметим через 120° вправо и влево точки B и C.

6. На расстоянии 90° от каждой точки слева поставить отметку положительного максимума, а справа — отрицательного.

7. Определить, между какими максимумами, противоположными по знаку максимуму ошибки, находится максимум ошибки.

8. Установить систему в точку L и выправить ошибку L—R, уменьшая соответствующие сопротивления, выбирая каждым из них долю ошибки, обратно пропорциональную расстоянию положения его максимума до положения максимума ошибки.

9. Возвратить систему в нулевое положение и сместить стрелку указателя, установив ее на нуль.

Несмотря на кажущуюся сложность этой методики, после некоторой тренировки электрическая («векторная») регулировка одного комплекта занимает не более часа у одного человека с квалификацией техника. Практика показала, что таким способом можно регулировать нелинейности, достигающие 40—50% от диапазона.

Таким образом, система с трехлучевым емкостным датчиком обладает весьма широкими регулировочными возможностями.

Определим крутизну сигнала системы с трехлучевым емкостным датчиком, в которой произведена векторная регулировка. В некоторых случаях закон изменения крутизны сигнала играет важную роль, например, тогда, когда в систему требуется ввести некоторый дополнительный сигнал от постороннего источника для принудительного изменения показаний указателя.

Чисто аналитический вывод формулы для выходного сигнала при различных сопротивлениях звезды громоздок и не дает четкого представления о происходящих процессах. Гораздо проще произвести вывод этой формулы непосредственно из векторной диаграммы рис. 35.

Крутизна сигнала при малых отклонениях от положе-

ния равновесия прямо пропорциональна самой величине вектора AB, так как при малых отклонениях проекция этого вектора на ось положения ротора сельсина пропорциональна длине этого вектора. Поэтому достаточно рассмотреть изменения вектора AB при изменении положения ротора датчика (при заторможенном роторе сельсина) или изменении положения ротора сельсина (при неподвижном роторе датчика), чтобы определить крутизну сигнала.

Из треугольника ABO находим:

$$AB = \sqrt{AO^2 + OB^2 - 2AOOB\cos\angle AOB} = \sqrt{a^2 + R^2 - 2aR\cos\psi} = R\sqrt{1 + \left(\frac{a}{R}\right)^2 - 2\frac{a}{R}\cos\psi},$$

или

$$\frac{AB}{R} = \sqrt{1 + \left(\frac{a}{R}\right)^2 - 2\frac{a}{R}\cos\psi}.$$

Выражение для сигнала в зависимости от угла поворота ротора датчика в установившемся режиме системы получим, умножив полученное выражение на величину радиуса окружности, равную:

$$R = \frac{1{,}5e_{\text{р}}kC_mR_{\text{н}}\omega}{\sqrt{1 + 9C_0^2R_{\text{н}}^2\,\omega^2}}\sin(\omega t + \varphi), \tag{58}$$

в результате чего получим:

$$u_R = \frac{1{,}5e_{\text{р}}kC_mR_{\text{н}}\omega}{\sqrt{1 + 9C_0^2R_{\text{н}}^2\,\omega^2}}\sin(\omega t + \varphi)\sqrt{1 + \left(\frac{a}{R}\right)^2 - 2\frac{a}{R}\cos\psi}. \tag{59}$$

Для того чтобы получить выражение сигнала через угол поворота ротора сельсина, рассмотрим треугольник AOB. По теореме синусов напишем:

$$\frac{AB}{\sin\psi} = \frac{R}{\sin(180^\circ - \theta)} = \frac{a}{\sin[180^\circ - (180^\circ - \theta) - \psi]},$$

или

$$\frac{AB}{\sin\psi} = \frac{R}{\sin\theta} = \frac{a}{\sin(\theta - \psi)},$$

отсюда

$$\sin(\theta-\psi)=\frac{a}{R}\sin\theta$$

и далее

$$\frac{AB}{R}=\frac{\sin\psi}{\sin\theta}=\frac{\sin[\theta-(\theta-\psi)]}{\sin\theta}=$$

$$=\frac{\sin\theta\cos(\theta-\psi)-\cos\theta\sin(\theta-\psi)}{\sin\theta},$$

откуда после несложных преобразований и принимая во внимание (56), получим:

$$\frac{AB}{R}=\sqrt{1-\left(\frac{a}{R}\right)^2\sin^2\theta}-\frac{a}{R}\cos\theta.$$

Умножив выражение на величину радиуса, найдем окончательно выражение для выходного сигнала как функцию угла поворота ротора отрабатывающего сельсина:

$$u_R=\frac{1{,}5e_\text{р}kC_mR_\text{н}\omega}{\sqrt{1+9C_0^2R_\text{н}^2\,\omega^2}}\left[\sqrt{1-\left(\frac{a}{R}\right)^2\sin^2\theta}-\frac{a}{R}\cos\theta\right]\times$$

$$\times\sin(\omega t+\varphi). \qquad (60)$$

Из выражений для выходного напряжения схемы следует, что крутизна сигнала одинакова на всем диапазоне только в том случае, если $a=0$, т. е., когда все сопротивления звезды равны между собой. Во всех остальных случаях крутизна переменная по диапазону и меняется монотонно от начала к концу, возрастая или убывая в зависимости от начала отсчета.

Необходимо отметить следующую особенность: крутизна сигнала возрастает на том участке, где одному и тому же приращению поворота ротора датчика соответствует меньшее приращение угла поворота ротора сельсина, и наоборот, что обычно и требуется в подобных системах.

3. Влияние линии связи на точность дистанционной передачи

В дистанционной передаче с трехлучевым емкостным датчиком во избежание паразитных наводок необходимо статор сельсина соединять со статором датчика экранированными проводами. При этом емкости этих проводов присоединяются параллельно сопротивлениям звезды.

Если все три сопротивления звезды в точности одина-

ковы, то средняя точка не сместится от присоединения указанных емкостей, так как эти три емкости в свою очередь одинаковы между собой. Если же в системе была произведена векторная регулировка, то сопротивления звезды окажутся разными, и подключение трех одинаковых емкостей вызовет смещение средней точки звезды по потенциалу ближе к центру треугольника ABC (рис. 36). Таким образом, в системе возникнет искажение показания за счет изменения смещения средней точки, и, следовательно, однажды произведенная тарировка с короткой линией нарушится, если в системе будет применена длинная линия.

Рассмотрим подробнее этот случай.

На рис. 28 изображена схема системы с различными сопротивлениями звезды. Определим э. д. с. между точками a и $б$ этой схемы (э. д. с. между центром треугольника ABC и точкой O векторной диаграммы рис. 34).

Составим уравнения схемы:

$$\left.\begin{aligned} e_1 &= U_1 + i_1 r_1; \\ e_2 &= U_1 + i_2 r_2; \\ e_3 &= U_1 + i_3 r_3; \\ i_1 + i_2 + i_3 &= 0, \end{aligned}\right\} \qquad (61)$$

где U_1 — искомое напряжение.

Решив эту систему, найдем:

$$U_1 = \frac{e_1 r_2 r_3 + e_2 r_1 r_3 + e_3 r_1 r_2}{r_1 r_2 + r_1 r_3 + r_2 r_3}.$$

Известно, что

$$e_1 = e_р k \cos\theta;$$

$$e_2 = e_р k \cos(\theta + 120^\circ);$$

$$e_3 = e_р k \cos(\theta + 240^\circ). \qquad (34)$$

Положим:

$$\frac{r_1}{m} = r_2 = r_3 = R, \qquad (62)$$

где m — некоторый коэффициент отношения сопротивления r_2 и r_3 к r_1.

Получим:

$$U_1 = e_р k \cos\theta \frac{1 - m}{1 + 2m} \approx \frac{e_р k}{3}(1 - m)\cos\theta.$$

Если в систему включена длинная линия связи, то параллельно каждому сопротивлению звезды присоединяются соответственно три одинаковые емкости C (собственные емкости проводов). Тогда в уравнения (61) вместо r_1 нужно подставить выражение $\frac{r_1}{r_1Cp+1}$, вместо r_2 — выражение $\frac{r_2}{r_2Cp+1}$, вместо r_3 — выражение $\frac{r_3}{r_3Cp+1}$ и вместо U_1 — выражение U_1'.

Система уравнений примет вид:

$$\left.\begin{aligned} e_1 &= U_1' + i_1\frac{r_1}{r_1Cp+1};\\ e_2 &= U_1' + i_2\frac{r_2}{r_2Cp+1};\\ e_3 &= U_1' + i_3\frac{r_3}{r_3Cp+1};\\ i_1 &+ i_2 + i_3 = 0. \end{aligned}\right\} \qquad (63)$$

Отсюда

$$U_1' = \frac{e_1r_2r_3 + e_2r_1r_3 + e_3r_1r_2}{3r_1r_2r_3Cp + r_1r_2 + r_2r_3 + r_1r_3}.$$

Подставив уравнения (34) и (62), получим:

$$U_1' = e_\text{р}k\cos\theta\,\frac{1-m}{1+2m+3RCp}. \qquad (64)$$

Смещение средней точки звезды будет равно:

$$\Delta U = U_1' - U_1 = -\,e_\text{р}k\cos\theta\,\frac{(1-m)\,3RCp}{(1+2m)(1+2m+3RCp)}.$$

Так как m весьма близко к единице, можно с достаточным приближением написать:

$$\Delta U = -\,\frac{e_\text{р}k\cos\theta\,(1-m)\,RCp}{3\,(1+RCp)}.$$

Заменив p на $j\omega$, выделим вещественную часть сигнала, которая и будет отрабатываться следящей системой:

$$Re\,[\Delta U(\omega)] = \frac{e_\text{р}k\cos\theta\,(1-m)\,R^2C^2\omega^2}{3\,(1+R^2C^2\omega^2)}. \qquad (65)$$

Пренебрегая членом $R^2C^2\omega^2$ по сравнению с единицей, находим выражение для максимального дополнительного смещения центра звезды:

$$\Delta U_{\text{см}} = \frac{e_{\text{р}}kR^2C^2\omega^2(1-m)}{3}.$$

Определим величину m.

Так как величина U_1 относится к $|U_R|$ (модулю сигнала, снимаемого с датчика), как $\frac{U_1}{|U_R|} = \frac{a}{r}$ (см. гл. 3, § 2), можно написать, что

$$\frac{a}{r} = \sin(\theta - \psi)_{\text{макс}} = \sin\delta_{\text{макс}}, \tag{66}$$

где $\delta = \theta - \psi$ — ошибка нелинейности, выправленная векторной регулировкой.

Отсюда

$$\frac{U_1}{|U_R|} = \sin\delta_{\text{макс}}.$$

Из формулы (37) следует:

$$|U_R| = \frac{1{,}5e_{\text{р}}kC_mR_{\text{н}}\omega}{\sqrt{1+9C_0^2R_{\text{н}}^2\omega^2}} \approx 1{,}5e_{\text{р}}kC_mR_{\text{н}}\omega.$$

Таким образом,

$$\frac{U_1}{|U_R|} = \frac{e_{\text{р}}k\,\frac{1-m}{3}}{1{,}5e_{\text{р}}kC_mR_{\text{н}}\omega} = \frac{1-m}{4{,}5C_mR_{\text{н}}\omega} = \sin\delta_{\text{макс}},$$

отсюда

$$1 - m = 4{,}5C_mR_{\text{н}}\omega\sin\delta_{\text{макс}}.$$

Найдем отношение дополнительного смещения к $|U_R|$:

$$\frac{\Delta U}{|U_R|} = \frac{e_{\text{р}}kR^2C^2\omega^2(1-m)}{3\cdot 1{,}5e_{\text{р}}kC_mR_{\text{н}}\omega} = R^2C^2\omega^2\sin\delta_{\text{макс}}.$$

Отсюда окончательно ошибка от включения длинной линии в систему составит [см. (56)]:

$$\delta_{\text{доп.макс}} = \arcsin(R^2C^2\omega^2\sin\delta_{\text{макс}}). \tag{67}$$

Пример. Определить максимальную ошибку в дистанционной передаче с трехлучевым емкостным датчиком. Векторной регулировкой выбрана ошибка в 30°.

Длина линии . . . . $l_{пр} = 40$ *м*
Провод марки . . . . БПВЛЭ-0,75 *мм²*
Рабочая частота . . . . $f = 400$ *гц*
Сопротивление фазы звезды . . . . . $R = 2$ *ком*

$$C = l_{пр} C_{уд} = 40 \cdot 225 = 9\,000 \text{ пф}.$$

$$\delta_{доп.макс} = \arcsin [2^2 \cdot 10^6 \cdot 9^2 \cdot 10^{-18} \cdot 2{,}5^2 \cdot 10^6 \sin 30°] = \arcsin 10^{-3} = 3{,}6'.$$

В случае, если ошибка от включения длинной линии недопустимо велика, следует уменьшать сопротивления звезды (пропорционально) или выбирать провода с малой удельной емкостью, например, коаксиальные.

Глава четвертая

ЕМКОСТНЫЕ ФАЗОВРАЩАТЕЛИ

Одним из видов емкостных датчиков перемещения являются емкостные фазовращатели.

Как известно, фазовращателем называется устройство, на выходе которого имеется электрическое напряжение переменного тока с постоянной амплитудой, фаза которого пропорциональна или равна углу поворота оси его ротора. Емкостные фазовращатели исполняются двух- и трехфазными.

1. Двухфазные фазовращатели

Схема включения емкостного двухфазного фазовращателя изображена на рис. 38,*а* и *б*.

Для правильной работы фазовращателя необходимо на пластины его статора подавать напряжения:

на I пластину

$$e_1 = E \sin \omega t;$$

на II пластину

$$e_2 = E \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right);$$

на III пластину

$$e_3 = E \sin (\omega t + \pi);$$

на IV пластину

$$e_4 = E \sin \left(\omega t + \frac{3\pi}{2}\right). \qquad (68)$$

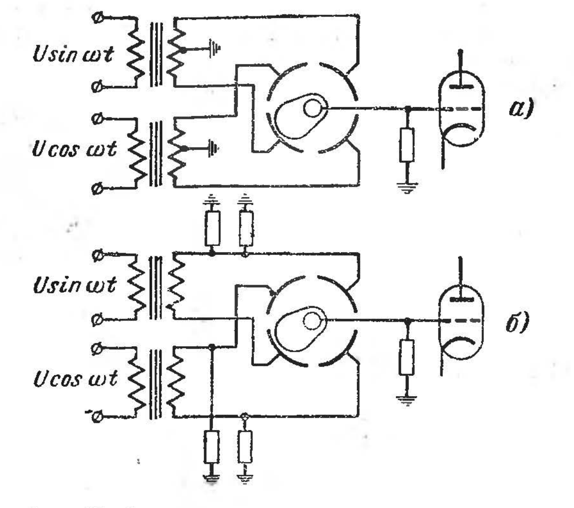


Рис. 38. Схема включения емкостного двухфазного фазовращателя.

При этом емкости между каждой пластиной и ротором должны соответственно составлять:

$$\left.\begin{aligned} C_1 &= C_0 + C_m \sin n\alpha; \\ C_2 &= C_0 + C_m \sin\left(n\alpha + \frac{\pi}{2}\right); \\ C_3 &= C_0 + C_m \sin(n\alpha + \pi); \\ C_4 &= C_0 + C_m \sin\left(n\alpha + \frac{3}{2}\pi\right), \end{aligned}\right\} \quad (69)$$

где C_0 — постоянная составляющая емкости;

C_m — переменная составляющая емкости;

α — угол поворота ротора фазовращателя;

n — число электрической редукции.

Эквивалентная схема включения фазовращателя изображена на рис. 39, а векторная диаграмма — на рис. 40.

Здесь $OA = e_1$; $OB = e_2$; $OC = e_3$; $OD = e_4$; AR, BR, CR и DR — падения напряжения на емкостях, OR — падение напряжения на сопротивлении $R_н$.

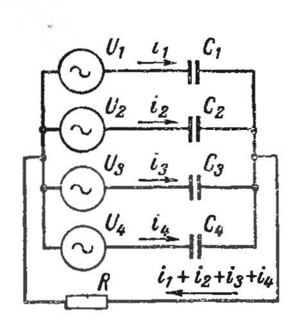


Рис. 39. Эквивалентная схема включения фазовращателя.

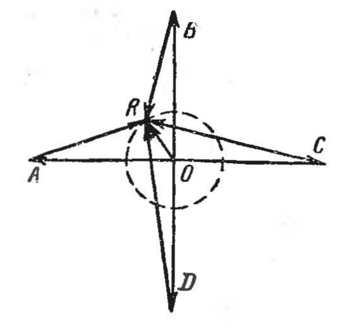


Рис. 40. Векторная диаграмма схемы с двухфазным фазовращателем.

Составим уравнения схемы рис. 39:

$$\left.\begin{aligned}
e_1 &= \left(\frac{1}{C_1R_p}+1\right)i_1R+i_2R+i_3R+i_4R;\\
e_2 &= \left(\frac{1}{C_2R_p}+1\right)i_2R+i_1R+i_3R+i_4R;\\
e_3 &= \left(\frac{1}{C_3R_p}+1\right)i_3R+i_1R+i_2R+i_4R;\\
e_4 &= \left(\frac{1}{C_4R_p}+1\right)i_4R+i_1R+i_2R+i_3R;
\end{aligned}\right\} \qquad (70)$$

$$U_R = i_1R+i_2R+i_3R+i_4R;$$

$$e_1 = -e_3;\quad e_2 = -e_4.$$

Определим U_R:

$$\left.\begin{aligned}
U_R &= \frac{e_1(1-C_2C_4R^2p^2)(C_1-C_3)R_p}{1+(C_1+C_2+C_3+C_4)R_p}+\frac{e_2(1-C_1C_3R^2p^2)(C_2-C_4)R_p}{1+(C_1+C_2+C_3+C_4)R_p};\\
u_R &= \frac{2eC_mR_p}{1+4C_0R_p}\times\\
&\times\sqrt{(1-C_0^2R^2p^2)+\frac{1}{4}C_m^2R^2p^2\sin^2 2\alpha\,[C_m^2R^2p^2+4-4C_0^2R^2p^2\times}\\
&\times\sin(\omega t+n\psi)];
\end{aligned}\right\} \qquad (71)$$

$$n\psi = \operatorname{arctg}\frac{\left[1-\left(C_0^2-\frac{1}{4}C_m^2+\frac{1}{4}C_m^2\cos 2\alpha\right)R^2p^2\right]}{\left[1-\left(C_0^2-\frac{1}{4}C_m^2-\frac{1}{4}C_m^2\cos 2\alpha\right)R^2p^2\right]}\operatorname{tg}\left(n\alpha+\frac{\pi}{2}\right).$$

Из этих выражений видно, что амплитуда на выходе двухфазного емкостного фазовращателя не остается строго постоянной. Точно так же и фаза выходного сигнала не точно равна углу поворота фазовращателя. Однако доля ошибки невелика. Для ее уменьшения следует уменьшать произведение $C_m R\omega$, при этом уменьшается и амплитуда выходного сигнала. При $C_m R\omega = 10^{-2}$ ошибка фазы составляет всего несколько минут.

Окончательно можно считать, что

$$u_R = \frac{2eC_m R\omega}{\sqrt{1 + 16C_0^2 R^2 \omega^2}} \sin\left(\omega t + n\alpha + \frac{\pi}{2}\right). \qquad (72)$$

Конструктивно двухфазный фазовращатель может быть выполнен как плоским, так и цилиндрическим.



Рис. 41. Развертка ротора цилиндрического фазовращателя.

Как видно из формул (69), емкости между каждой пластиной статора и ротором должны меняться по синусоидальному закону. Фазовращатель является датчиком с переменной S, следовательно, площадь перекрытия пластин определяется тем же законом.

Для цилиндрического фазовращателя полностью пригоден тот же вывод формулы для определения формы кривой ротора, что и для трехлучевого цилиндрического датчика. Отличие заключается в том, что четные редукции могут быть получены только путем увеличения числа статорных пластин. Кроме того, в двухфазном фазовращателе нельзя получить угол ширины пластины $\alpha_0 = \frac{\pi}{n}$, ширина пластины может быть не более $\alpha_0 = \frac{\pi}{2n}$.

Таким образом,

$$S_0 = \frac{\pi}{2n} R h_0 m; \qquad (73)$$

$$S_m = 2R \frac{h_m}{n} \sin \frac{\pi}{4} m = \sqrt{2} R \frac{h_m}{n} m. \qquad (74)$$

Пример. Рассчитать цилиндрический двухфазный фазовращатель:

Диаметр ротора максимальный . . . . . . $D_p = 50$ *мм*
Высота ротора . . . . $H_p = 15$ *мм*
Минимальная толщина основания ротора $\Delta h = 1$ *мм*
Величина зазора . . . . $d = 0,4$ *мм*
Напряжение питания . . . . $e = 36$ *в*
Частота питания . . . . $f = 400$ *гц*
Сопротивление нагрузки фазовращателя $R_н = 1$ *Мом*
Число электрической редукции . . . . . $n = 1$

$$h_0 + h_m = 15; \quad h_0 - h_m = 1 \text{ мм}.$$

$$h_0 = 8 \text{ мм}; \quad h_m = 7 \text{ мм}.$$

Развертка ротора изображена на рис. 41.

Найдем площади S и S_m:

$$S_0 = 25 \cdot 8 \frac{\pi}{2} = 314 \text{ мм}^2 = 3,14 \text{ см}^2;$$

$$S_m = \sqrt{2} \cdot 25 \cdot 7 = 250 \text{ мм}^2 = 2,5 \text{ см}^2.$$

Емкости C_0 и C_m:

$$C_0 = \frac{0,885 \cdot 3,14}{0,4} = 7 \text{ пф};$$

$$C_m = \frac{0,885 \cdot 2,5}{0,4} = 5,5 \text{ пф}.$$

Выходное напряжение фазовращателя (72)

$$U_R = \frac{2 \cdot 36 \cdot 5,5 \cdot 10^{-12} \cdot 10^6 \cdot 2\pi 400}{\sqrt{1 + 16 \cdot 7^2 \cdot 10^{24} \cdot 10^{12} \cdot 4\pi 400^2}} = \frac{0,98}{\sqrt{1 + 4,9 \cdot 10^{-3}}} = 0,98 \text{ в}.$$

Форма пластины ротора плоского фазовращателя (рис. 42) определяется так же, как и в случае трехлучевого плоского датчика. Отличия здесь те же, что и у цилиндрического фазовращателя; угол, занимаемый пластиной статора, не может быть больше, чем $\frac{\pi}{2n}$, и тогда

$$S_0 = \frac{\pi}{4n}\left(\rho_1^2 + \frac{1}{2}\rho_2^2 - R^2\right)m; \quad (75)$$

$$S_m = \frac{\sqrt{2}}{4}\rho_2^2. \quad (76)$$

Формула, по которой подсчитывается зависимость $\rho = f(\alpha)$, та же, что и (55):

$$\rho = \sqrt{\rho_1^2 + \rho_2^2 \cos^2 \frac{n\alpha}{2}}.$$

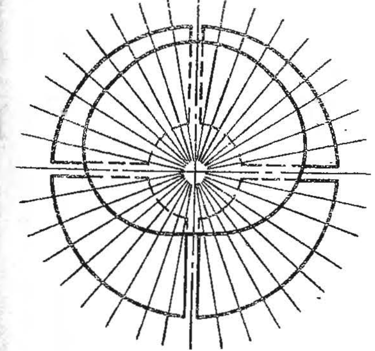


Рис. 42. Плоский емкостный фазовращатель.

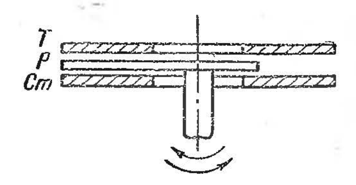


Рис. 43. Плоский фазовращатель с неподвижным токосъемом.

Емкостный двухфазный плоский фазовращатель может быть выполнен и с неподвижным токосъемом. Токосъем выполняется в виде кольца, расположенного над ротором (рис. 43). Ротор при этом заземляется.

При этом S_m подсчитывается по той же формуле (76), а за расстояние d принимается расстояние между статором и токосъемом.

П р и м е р. Рассчитать емкостный двухфазный плоский фазовращатель со следующими параметрами:

Максимальный диаметр статора . . . . $D_{ст.макс} = 60$ *мм*
Минимальный диаметр статора . . . . $D_{ст.мин} = 20$ *мм*
Величина зазора . . . . $d = 0{,}4$ *мм*
Редукция . . . . $n = 1$
Напряжение питания . . . . $e = 36$ *в*
Частота питания . . . . $f = 400$ *гц*
Сопротивление нагрузки . . . . $R_н = 1{,}0$ *Мом*

Определим ρ_1 и ρ_2:

Положим $\rho_{макс} = 28$ *мм*, чтобы избежать краевого эффекта; $S_{мин} = 13$ *мм*:

$$\rho_1 = \rho_{мин} = 13 \text{ мм};$$

$$\rho_2 = \sqrt{\rho_{макс}^2 - \rho_1^2} = \sqrt{28^2 - 13^2} = 24{,}8 \text{ мм}.$$

Построим функцию профиля ротора:

$$\rho_2 = \sqrt{13^2 + 24{,}8^2 \cos^2 \frac{\alpha}{2}} = \sqrt{169 + 615 \cos^2 \frac{\alpha}{2}}.$$

α	0	±10°	±20°	±30°	±40°	±50°
ρ	28	27,8	27,6	27,2	26,6	25,9
α	±60°	±70°	±80°	±90°	±100°	±110°
ρ	25	24,1	23	21,8	20,5	19,2

α	±120°	±130°	±140°	±150°	±160°	±170°	±180°
ρ	17,9	16,6	15,5	14,5	13,7	13,2	13

Емкостный фазовращатель изображен на рис. 42.

Определим напряжение на выходе фазовращателя.

$$S_0 = \frac{\pi}{4}\left(13^2 + \frac{1}{2}\,24,8^2 - 10^2\right) = 300\ мм^2 = 3\ см^2;$$

$$S_m = \frac{\sqrt{2}}{4}\,24,8^2 = 220\ мм = 2,2\ см;$$

$$C_0 = \frac{0,885 \cdot 3}{0,4} = 6,7\ пф;$$

$$C_m = \frac{0,885 \cdot 2,2}{0,4} = 4,85\ пф;$$

$$U_R = \frac{2 \cdot 36 \cdot 4,85 \cdot 10^{-12} \cdot 10^6 \cdot 2\pi 400}{\sqrt{1 + 16 \cdot 6,7^2 \cdot 10^{-24} \cdot 10^{12} \cdot 4\pi^2 \cdot 400^2}} = 0,87\ в.$$

2. Трехфазные фазовращатели

Трехлучевой датчик может быть использован в качестве трехфазного фазовращателя. Схема включения его фазовращателем изображена на рис. 44, *а* и *б*.

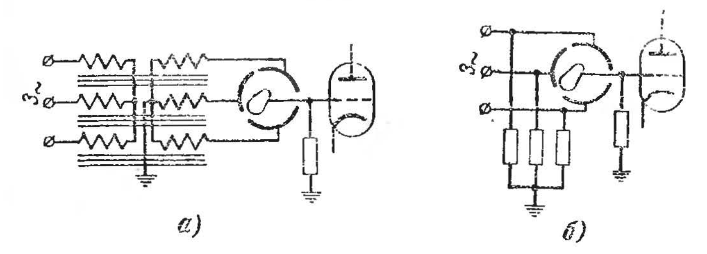


Рис. 44. Схемы включения трехфазного фазовращателя.

На пластины статора необходимо подавать напряжения относительно средней точки:

на первую пластину

$$e_1 = E \sin \omega t;$$

на вторую пластину

$$e_2 = E \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right);$$

на третью пластину

$$e_3 = E \sin\left(\omega t + \frac{4}{3}\pi\right). \qquad (77)$$

Эквивалентная схема та же, что и для включения трехлучевого датчика, и изображена на рис. 27. Вывод уравнения тот же, что и для трехлучевого датчика. Отличие заключается в том, что вместо θ фигурирует ωt, а вместо $e_p k \sin \omega t$ фигурирует e. Тогда окончательный вид формулы напряжения на выходе фазовращателя составит:

$$u_R = \frac{1,5eC_m R\omega}{\sqrt{9C_0^2 R^2\omega^2 + 1}} \sin(\omega t + \varphi - n\alpha), \tag{78}$$

где

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{1}{3C_0 R\omega}.$$

Глава пятая

НЕКОТОРЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Рекомендации по конструированию емкостных датчиков и их включению

При проектировании емкостного устройства независимо от его конструкции возникает вопрос крепления отдельных его частей. Все детали датчика (кроме ротора в конструкции с неподвижным токосъемом) должны быть тщательно

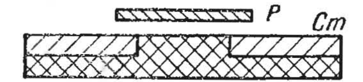


Рис. 45. Разрез емкостного датчика.

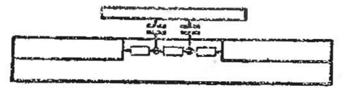


Рис. 46. Эквивалентная схема датчика.

изолированы друг от друга. Сам емкостный датчик обладает высоким внутренним сопротивлением, достигающим десятков и сотен мегом.

Рассмотрим случай, когда сопротивление изоляции, с помощью которой крепятся пластины статора, недостаточно высоко (рис. 45).

При недостаточно высоком значении поверхностного сопротивления изоляции по ее поверхности протекает ток от одной пластины статора к другой, создавая на этом участке падение напряжения. Вследствие неравномерности

свойств изоляции падение напряжения вдоль изоляционного участка неравномерно. Отдельные участки изоляции в свою очередь имеют определенную емкость с пластиной ротора: емкость каждого элемента находится под потенциалом данного элемента изоляционного участка (рис. 46). Площадь пластин как бы увеличивается, причем неодинаково. Эквивалентная схема датчика вместе с сопротивлением утечки сетки первого каскада изображена на рис. 47.

Здесь $R_э$ и $C_э$ —эквивалентные сопротивления и емкость участка изоляции. Так как сопротивление изоляции велико, то при компенсации основного сигнала следящей системой сигнал от изоляционного участка остается

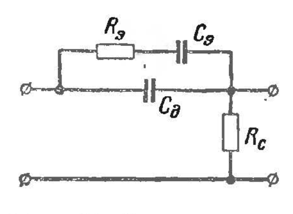


Рис. 47. Эквивалентная схема датчика.

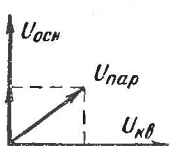


Рис. 48. Векторная диаграмма схемы с паразитным сигналом.

некомпенсированным. Фаза этого сигнала смещена на некоторый угол по отношению к основному сигналу (рис. 48). Указанный сигнал может быть разложен на составляющую, совпадающую по фазе с основным сигналом, и составляющую, смещенную на угол 90° от основного сигнала (квадратичная). Первая из них также компенсируется следящей системой, а так как свойства изоляции меняются со временем и от внешних условий (температура, влажность, давление), меняется и доля этой составляющей сигнала. Наличие этого сигнала приводит к медленному сползанию стрелки указателя. Особенно это заметно при повышенной температуре и влажности.

Вторая из этих составляющих не компенсируется и просматривается на осциллографе в установившемся состоянии следящей системы. Она забивает усилитель вследствие нелинейной характеристики усилителя, уменьшает коэффициент усиления и перегревает двигатель, а поэтому является крайне нежелательной.

Для устранения этих явлений необходимо по возможности относить изоляцию от ротора, закрывать ее металлическими заземленными деталями или металлическими де-

талями статора (рис. 49), по возможности избегать ее, не употреблять совсем там, где может иметь место емкостное влияние на токосъемную пластину, употреблять негигроскопичные изолирующие вещества с высоким поверхностным сопротивлением.

Рис. 49. Экранировка изоляции металлическими пластинами статора.

У датчиков с заземленным ротором таких высоких требований к собственно изоляционному промежутку не предъявляется, так как сам ротор экранирует токосъем от этого промежутка.

Во всех случаях желательно помнить, что наилучшим изолятором является воздушный промежуток.

Таким образом, требование к конструкции датчика можно сформулировать так: не должно быть прямой видимости с пластины, с которой снимается сигнал, на изолирующие детали.

Иногда даже при правильном выполнении датчика на осциллографе все же просматривается квадратичный сигнал. При этом система ведет себя стабильно. Причина этого заключается в следующем.

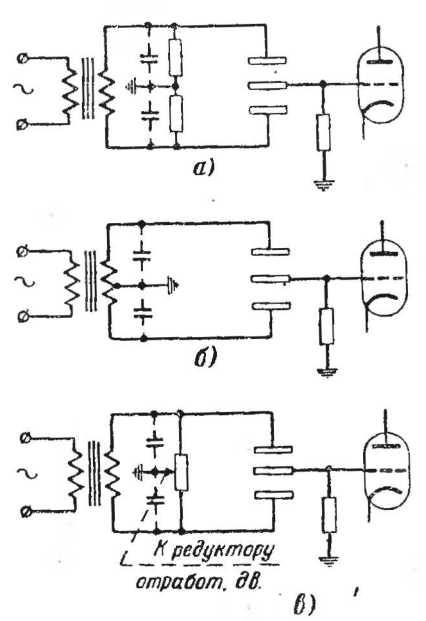


Рис. 50. Схемы включения двухлучевого датчика.

Двухлучевые датчики обычно включаются по схемам *а*, *б* или *в* рис. 50.

Обмотка трансформатора, питающая датчик, имеет распределенную емкость с железным сердечником, с первичной обмоткой и другими деталями. При этом оказывается, что оба конца этой обмотки имеют различную емкость на землю. В схеме рис. 50,*а* эти емкости шунти-

руют обмотки трансформатора, в схемах рис. 50,*б* и *в* — сопротивления. Во всех случаях в результате неодинаковости этих емкостей происходит некоторый сдвиг фаз э. д. с., питающих обе половины емкостного датчика (рис. 51). В результате при полном уравновешивании системы по основному сигналу, уравновешивания по всему сигналу не происходит. Остается постоянная доля квадратичного сигнала, которая нежелательна по изложенным выше причинам.

Необходимо отметить, что наличие паразитного квадратичного сигнала делает систему чувствительной к изменению питающего напряжения, и особенно частоты. Это происходит потому, что вследствие нелинейных свойств усилителя квадратичный сигнал доходит до двигателя в измененном виде, при этом на обмотке управления он уже не лежит точно под углом 90°, а раскладывается по диаграмме, изображенной на рис. 48, создавая сигнал, лежащий в фазе с основным. Этот сигнал компенсируется следящей системой. При изменении частоты меняется квадратичный сигнал и соответственно меняется доля сигнала, компенсируемого следящей системой. Поэтому одним из признаков отсутствия квадратичного сигнала в схеме является независимость показаний системы от частоты питающего напряжения.

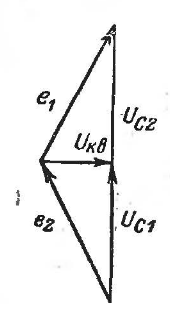


Рис. 51. Векторная диаграмма возникновения паразитного сигнала.

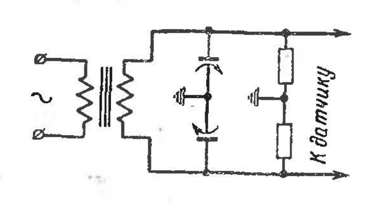


Рис. 52. Компенсация паразитного сигнала триммерами.

Для компенсации квадратичного сигнала нужно выполнить обмотку питающего трансформатора симметричной, стремиться к уменьшению собственной емкости трансформатора и подводящих проводов, кроме того, допустимо поставить подстроечные конденсаторы (триммеры) по 25—30 *пф* в плечи трансформатора, как показано на рис. 52, для искусственного симметрирования э. д. с.

В схемах с емкостными фазовращателями рис. 38,*б* и 44,*б* средняя точка образована сопротивлениями. Неоди-

наковость этих сопротивлений приводит к нелинейным изменениям фазы с изменением положения ротора. Ошибку фазы можно сосчитать по формуле (56).

Обычно от фазовращателя требуется пропорциональность между изменением фазы и изменением угла поворота ротора. В этом случае сопротивления средней точки должны быть равны друг другу с точностью до пятого знака. Желательно также, чтобы сопротивления не меняли своего значения с температурой. Поэтому в схемах, где средняя точка выполнена на сопротивлениях, рекомендуется делать их проволочными константановыми с не очень большим значением (1—2 *ком*). Сопротивления в схеме с трехлучевым датчиком также следует выполнять из константана примерно той же величины.

Если емкостный датчик сконструирован правильно и изменение качества изоляции с температурой не влияет на его работу, то влияние температуры сказывается лишь постольку, поскольку меняются геометрические размеры датчика, например зазор и пр. В этом случае устранение температурных влияний — чисто конструкторская задача. Необходимо так подобрать коэффициенты линейного расширения, чтобы размеры самого датчика либо не менялись, либо менялись так, чтобы эти изменения взаимно компенсировались механически или электрически. Например, если датчик с переменной S выполнен круглым, то изменение температуры не влияет на точность передачи, так как все размеры датчика с изменением температуры меняются пропорционально и симметрично, а изменение зазора не создает дополнительной ошибки и т. д.

При определении габаритных размеров емкостных датчиков следует руководствоваться в основном конструктивными соображениями. Как правило, с увеличением габаритов датчика растет крутизна выходного сигнала и облегчаются условия работы усилителей. Однако это в свою очередь утяжеляет конструкцию, не создавая обычно слишком больших преимуществ.

При проектировании следует стремиться увеличить в первую очередь тот размер, за счет которого растет крутизна сигнала. Так, для датчиков с переменной S при отработке ротора датчика к нулевому положению для повышения крутизны сигнала нужно максимально увеличить ширину пластины и совсем не нужно стремиться увеличивать их длину. Но если, помимо крутизны, нас еще интересует и максимальный сигнал, который мы можем снять

с датчика (например, при необходимости в широких пределах обеспечить пропорциональное регулирование), тогда нужно увеличивать и длину пластин.

Для датчиков с переменным d геометрической величиной, обеспечивающей крутизну сигнала, является площадь пластины.

Обычно геометрические размеры датчиков измеряются несколькими сантиметрами.

Минимальный зазор в датчике может быть определен из условий пробоя воздуха и зависит от напряжения, приходящегося на одно плечо датчика. Значения напряжения пробоя воздушного промежутка в 1 *мм* следует брать не более 700 *в* действующего напряжения. Зная напряжение пробоя, можно всегда вычислить минимально допустимый зазор. Во всех случаях из конструктивных соображений не следует делать зазор меньше, чем 0,2—0,3 *мм*.

2. Рекомендации по построению многокаскадных усилителей низкой частоты к следящим системам переменного тока

Для следящих систем переменного тока с емкостными датчиками желательно применять усилитель с относительно высокоомным (порядка 1 *Мом*) входом. В связи с тем, что пока нет полупроводниковых приборов с высокоомным входом, приходится по крайней мере первые каскады таких усилителей выполнять на лампах.

Для обеспечения высокой точности работы следящих систем необходимо добиваться стабильности работы усилителя, содержащего четыре—пять, а иногда и больше каскадов. При этом вопрос постоянства коэффициента усиления является второстепенным, так как при изменении коэффициента усиления в следящей системе меняется лишь переходной процесс и в небольших пределах—чувствительность, а положение отрабатывающей оси указателя не меняется, так как при любом коэффициенте усиления сигнал, поступающий на вход усилителя с датчика в установившемся режиме, равен нулю. Гораздо опаснее дрейф усилителя переменного тока, что выражается в медленном сползании отрабатывающей оси с течением времени. Так же как и в случаях, вызванных употреблением плохой изоляции в емкостных датчиках, это сползание может достигать больших значений. Особенно резко такое сползание наблюдается при температурах, более высоких, чем +20° С, и при повышенной влажности окружающего воздуха.

Одной из причин такого дрейфа является то, что на управляющих сетках и анодах первых каскадов появляется и постепенно возрастает потенциал рабочей частоты либо от цепей накала (для следящих систем, работающих на частоте 400 *гц*), либо от цепей, питающих датчик, из-за наличия токов, протекающих по изолирующим и крепежным деталям (пластмасса, текстолит, хлорвинил и т. п.) вследствие недостаточно высокого значения их поверхностного сопротивления.

Несмотря на то, что справочные данные о поверхностном сопротивлении материалов указывают на достаточно высокие значения этих величин, на самом деле величины поверхностного сопротивления значительно ниже указанных значений вследствие загрязненности поверхности, гигроскопичности материалов и других факторов.

Для усилителей с малым коэффициентом усиления токи, протекающие по поверхности изоляторов, и потенциалы, возникающие от них, не имеют никакого значения. Для усилителей же с большим коэффициентом усиления эти потенциалы имеют очень большое значение и пренебрегать ими уже нельзя. Амплитуды токов утечки нестабильны во времени, зависят от многих факторов, растут с повышением температуры и не поддаются компенсации и учету, поэтому усилитель необходимо проектировать так, чтобы поверхностные токи отводились на землю, не достигая опасных точек.

Для получения хорошей стабильности усилителя необходимо, помимо соблюдения общеизвестных правил, принять ряд простых, но эффективных мер, перечисленных ниже:

1. В качестве ламп рекомендуется применять бесцокольные лампы («пальчики» или «дроби»).

2. Ламповые панели должны быть керамическими и предохраненными от загрязнения.

3. Цепи накала необходимо вести голым или в эмалевой изоляции проводом, ни в коем случае не перевивая проводов накала между собой. Если провода накала переплести между собой, между ними сквозь изоляцию начинают течь токи утечки, а с изоляции на другие цепи создаются нестабильные наводки.

4. В связи с тем, что с цепи накала на катод через емкости накал-катод наводится переменная э. д. с., необходимо ее компенсировать. Для этого нужно накальные цепи заземлить через низкоомный потенциометр по схеме

рис. 53а, либо в крайнем случае заземлить среднюю точку накальной обмотки.

Желательно, чтобы потенциометр был проволочным, например, марки ППЗ-11. Нельзя применять для этой цели малостабильные переменные сопротивления, например марки СПО.

Подключив осциллограф к одному из промежуточных каскадов, нужно установить потенциометр в положение, при котором паразитный сигнал, проходящий в усилитель

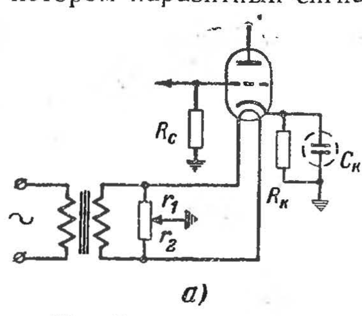


Рис. 53а. Включение потенциометра в цепь накала.

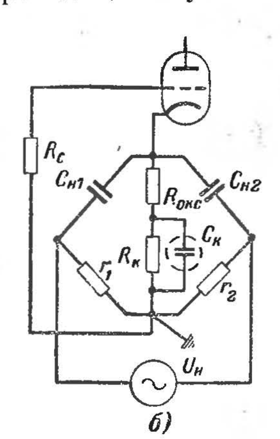


Рис. 53б. Эквивалентная схема цепи накала лампы с включенным потенциометром.

при отсутствии сигнала на входе, стал бы минимальным. При этом вход усилителя должен быть разомкнут. Перемещая движок потенциометра в это положение, мы тем самым балансируем мостовую схему, включающую в себя емкости накал-катод (рис. 53б), и уменьшаем паразитный сигнал, наводящийся на катод со стороны накала. Основную роль при этом играет балансировка первого и второго каскадов.

5. Точки крепления проводов накала не должны нигде касаться пластин, на которых закреплены анодные и сеточные цепи усилителя. То же относится ко всем цепям переменного тока и ко всем цепям большой протяженности, на которые может происходить наводка со стороны цепей переменного тока. В случае, если цепи переменного тока необходимо дать опорную точку, рекомендуется выполнить ее по рис. 54 так, чтобы паразитный сигнал, протекающий по поверхности изолятора, отводился на землю.

Точка крепления представляет собой либо заземленную металлическую стойку, на которой закреплена изолирую-

щая пластина с крепежным лепестком, либо стеклянную «слезку», впаянную в заземленную металлическую шайбу. Наиболее правильно собирать усилитель на металлических заземленных пластинах, впрессовывая в них для каждого отдельного контакта изоляционную втулку.

6. Всюду, где можно, монтаж необходимо вести по воздуху, избегая применения изоляции. Ни в коем случае не надевать на цепи переменного тока, проходящие вблизи первых каскадов, хлорвиниловые трубки, в крайнем случае применив не хлорвиниловые, а кембриковые трубки. Хорошей изоляцией является стеклярус. В случае применения хлорвиниловых трубок вследствие плохих изоляционных

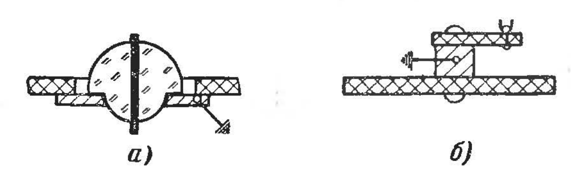


Рис. 54. Изолированная опорная точка.

свойств хлорвинила возможно протекание токов утечки через слой хлорвинила, а отсюда — нестабильная емкостная наводка на основные цепи.

7. Если усилитель представляет собой отдельный блок, необходимо провод сигнала проводить через отдельный разъем, в противном случае возможно появление в сигнальной цепи паразитного сигнала через пластмассу разъема от цепей переменного тока. Если удовлетворить это требование невозможно, нужно в общем разъеме отделить зажим, несущий сигнал, от зажима переменного тока (или имеющих переменную составляющую) зажимами, не имеющими переменной составляющей, или заземленными зажимами. Дополнительного экрана в разъеме устанавливать не нужно.

8. При монтаже усилителей, работающих в широком интервале температур, желательно избегать применения малостабильных сопротивлений, например типа УЛМ-0,12, вследствие их нестабильности и большого уровня шумов. Монтаж желательно выполнять на термостабилизированных сопротивлениях, например типа МЛТ-0,5.

9. Все входные цепи усилителя должны быть тщательно экранированы. Так, необходимо экранировать сопротивление утечки сетки первого каскада, все соединитель-

ные концы делать возможно короче. В качестве экранированного провода желательно применять провода марки БПТЭ. Ни в коем случае не следует надевать экранирующий чулок прямо на хлорвиниловую изоляцию провода без бумажной или шелковой оплетки. Сами лампы должны быть закрыты металлическими экранами, а лампы типа «дробь» — помещены в металлические трубки.

10. Управляющую сетку первого каскада (в случае применения лампы типа «дробь») опереть на крепление по рис. 54.

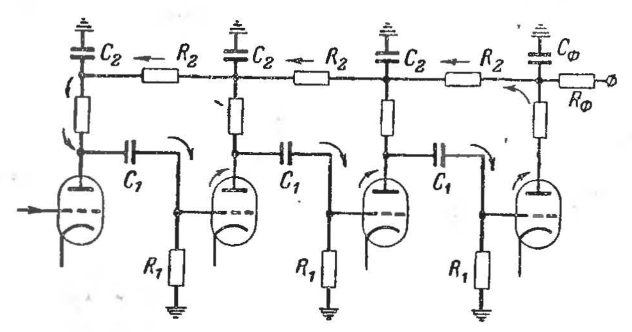


Рис. 55. Схема возбуждения усилителя.

Помимо перечисленного, для улучшения работы усилителя можно рекомендовать следующие меры:

1. Для уменьшения содержания паразитных высших гармоник, забивающих тракт усилителя и снижающих его коэффициент усиления, рекомендуется между анодами первого и второго каскадов включить малую емкость (порядка 50—300 *пф*). Включение емкости создает отрицательную обратную связь по высокой частоте, сильно очищает сигнал и поднимает коэффициент усиления всего усилителя по рабочей частоте, ранее уменьшенный паразитными сигналами вследствие нелинейности характеристики усилителя.

2. Усилитель, состоящий из нескольких каскадов, легко возбуждается по анодным цепям. Колебания, возникающие при этом, обычно в применяемых схемах имеют частоту порядка нескольких герц. При этом следящая система вообще перестает работать.

Рассмотрим механизм возникновения колебаний (рис. 55).

Если полезный сигнал, проходя через усилитель, встре-

чает на своем пути только дифференцирующие цепи вида рис. 56,*а* с характеристикой, показанной на рис. 56,*б*, то сигнал, возникающий вследствие генерации, проходит как через усилитель, так и обратно по анодным цепям, встречая, таким образом, кроме дифференцирующих цепей, еще и интегрирующие цепи вида, изображенного на рис. 57,*а*, с характеристикой рис. 57,*б*.

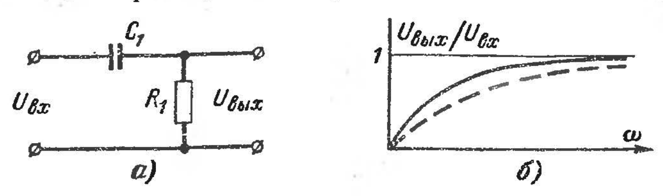


Рис. 56. Дифференцирующее звено и его характеристика.

Последовательное включение нескольких звеньев не меняет вида характеристики, но изменяет ее коэффициент усиления. Результирующие характеристики показаны пунктиром на тех же рисунках. Характеристики как бы

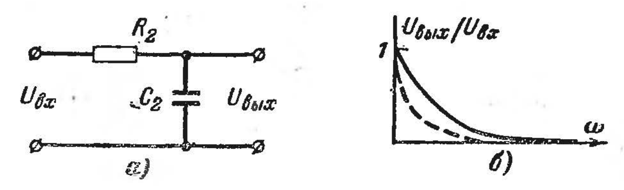


Рис. 57. Интегрирующее звено и его характеристика.

раздвигаются. Для одиночного дифференцирующего звена коэффициент усиления равен:

$$k_{\text{диф}} = \frac{T_1\omega}{\sqrt{1 + T_1^2\omega^2}}, \tag{79}$$

где $T_1 = R_1C_1$.

Для интегрирующего звена

$$k_{\text{инт}} = \frac{1}{\sqrt{1 + T_2^2\omega^2}}, \tag{80}$$

где $T_2 = R_2C_2$.

Коэффициент усиления двух этих звеньев, включенных последовательно, равен произведению их коэффициентов

усиления (рис. 58). При этом максимум усиления соответствует частоте

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{T_1 T_2}} \qquad (81)$$

и равен:

$$k = \frac{1}{1 + \frac{T_1}{T_2}}. \qquad (82)$$

Основным условием отсутствия колебаний в генераторе является следующее условие: коэффициент усиления по замкнутой цепи должен быть меньше единицы. Это значит, что ослабление сигнала дифференцирующими и интегрирующими цепями должно быть больше k', где k' — коэффициент усиления усилителя от второго до последнего каскада, охваченных обратной связью по анодным цепям. Если считать, что все каскады одинаковы, условие отсутствия колебаний можно рассчитывать для одного каскада. Для выполнения условия $k_3 < 1$ нужно уменьшать произведение R_1C_1 межкаскадной связи (сопротивление утечки сетки и переходную емкость) и увеличивать произведение R_2C_2 для цепей анодного питания. В первом случае выгодно идти по пути уменьшения C_1, а не R_1, так как при этом уменьшается отбор энергии от предыдущего каскада. Во втором случае выгодно идти по пути увеличения C_2, так как при увеличении R_2 уменьшается анодное напряжение на первых каскадах. Однако это возможно только за счет увеличения габаритов. При этом наибольшие емкости нужно ставить ближе к выходному каскаду, так как колебания могут охватить лишь часть каскадов и, в частности, возникнуть между двумя последними каскадами.

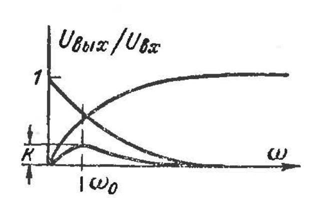


Рис. 58. Характеристика последовательно включенных интегрирующего и дифференцирующего звеньев.

При заданном коэффициенте усиления всего усилителя выгодно получать максимальное усиление от первого каскада, который не охвачен анодной связью.

В качестве некоторой дополнительной меры можно рекомендовать ставить отдельную анодную развязку на последний выходной (наиболее мощный) каскад.

Пример. Рассчитать переходные цепи и цепи питания для усилителя на пентодах с коэффициентом усиления каждого каскада $k_у = 40$. Рабочая частота $f = 400$ *гц*.

Из формулы $k_y k < 1$ получаем:

$$\frac{k_y}{1+\frac{T_2}{T_1}} < 1, \qquad (83)$$

отсюда

$$\frac{T_2}{T_1} > k_y - 1; \quad \frac{T_2}{T_1} > 39.$$

Положим допустимое ослабление сигнала рабочей частоты равным 7,5%, т. е.

$$1 - k_{диф} = 7{,}5\%,$$

тогда $k_{диф} = 0{,}925$.

Отсюда

$$\omega T_1 = \frac{k}{\sqrt{1-k^2}} = \frac{0{,}925}{\sqrt{1-0{,}925}} = 2{,}5.$$

Определим C_1. Положим $R_1 = 1{,}0$ *Мом*:

$$C_1 = \frac{T_1}{R_1} = \frac{2{,}5}{\omega R_1} = \frac{2{,}5\cdot 10^{12}}{2\pi 400\cdot 10^6} = 1\,000 \text{ пф}.$$

Определим T_2:

$$T_2 = \frac{39\pi}{1} = \frac{39\cdot 2{,}5}{\omega} = \frac{39\cdot 2{,}5}{2\pi\cdot 400} = 39\cdot 10^{-3} \text{ сек}.$$

Положим $C_2 = 1$ *мкф*, тогда

$$R_2 = \frac{T_2}{C_2} = \frac{39\cdot 10^{-3}}{1} = 39\cdot 10^{-3} \text{ Мом} = 39 \text{ ком}.$$

Так как каскады одинаковы, полученные данные пригодны для всех каскадов.

Реально в усилителе имеются и некоторые дополнительные ослабления, например деление паразитного сигнала между анодной нагрузкой и лампой, так что расчет произведен с некоторым запасом.

Как можно видеть из перечня, дополнительные требования к проектированию и монтажу не являются трудновыполнимыми. Практика показывает, что смонтированный подобным образом усилитель может работать при температурах от —60° С до +50° С совершенно стабильно (более высокие температуры не опробовались) в течение многих часов, не внося никаких искажений в работу системы.

Система, в которой был применен такой усилитель

(включая и другие элементы), показала высокую стабильность; отклонения не превышали тысячных долей процента.

На рис. 59 приведена схема усилителя, обеспечивающего коэффициент усиления до 500 000 (при отсутствии паразитного квадратичного сигнала на входе усилителя).

Усилитель состоит из четырех каскадов усиления по напряжению (лампы 6Ж2Б и 6Ж1Б) и выходного каскада, собранного на лампе 6Ж3П в триодном режиме, включенной по схеме катодного повторителя, нагрузкой которого является обмотка управления отрабатывающего двигателя.

Аноды всех ламп питаются от последовательной цепочки сопротивлений, между которыми включены развязывающие емкости. Связь между каскадами осуществлена достаточно малыми емкостями, что позволяет не ставить слишком больших емкостей в интегрирующие цепочки анодного питания. Выходной каскад, кроме этого, имеет самостоятельную развязку, отделяющую его от остальной схемы. Для уменьшения паразитных высших гармоник между анодами первого и второго каскадов включена малая (50—300 *пф*) емкость, посредством которой осуществляется отрицательная обратная связь по высокой частоте.

Каждый каскад имеет самостоятельное смещение.

Экранные сетки первых двух каскадов не имеют отдельных сопротивлений, так как в противном случае напряжение на них будет слишком мало, и при значениях анодной нагрузки в десятки килоом коэффициент усиления каскадов будет недостаточным.

Для подгонки фазы сигнала в цепи анода третьего каскада установлена фазосдвигающая емкость C_8; кроме того, сама обмотка управления отрабатывающего двигателя шунтирована также фазосдвигающей емкостью C_{15}.

В цепи накала установлен потенциометр, которым можно регулировать паразитный сигнал, который наводится на катоды ламп со стороны накала. Все одноименные выводы накала ламп соединены между собой. От силового трансформатора, помимо усилителя, питается обмотка возбуждения двигателя ДИД-0,5, потребляющего 36 *в*. В случае питания системы от сети с напряжением 36 *в* сеть переключается на соответствующие концы трансформатора.

Описанный усилитель при правильном монтаже может обеспечить коэффициент усиления до 500 000, который при необходимости может быть уменьшен до любого значения

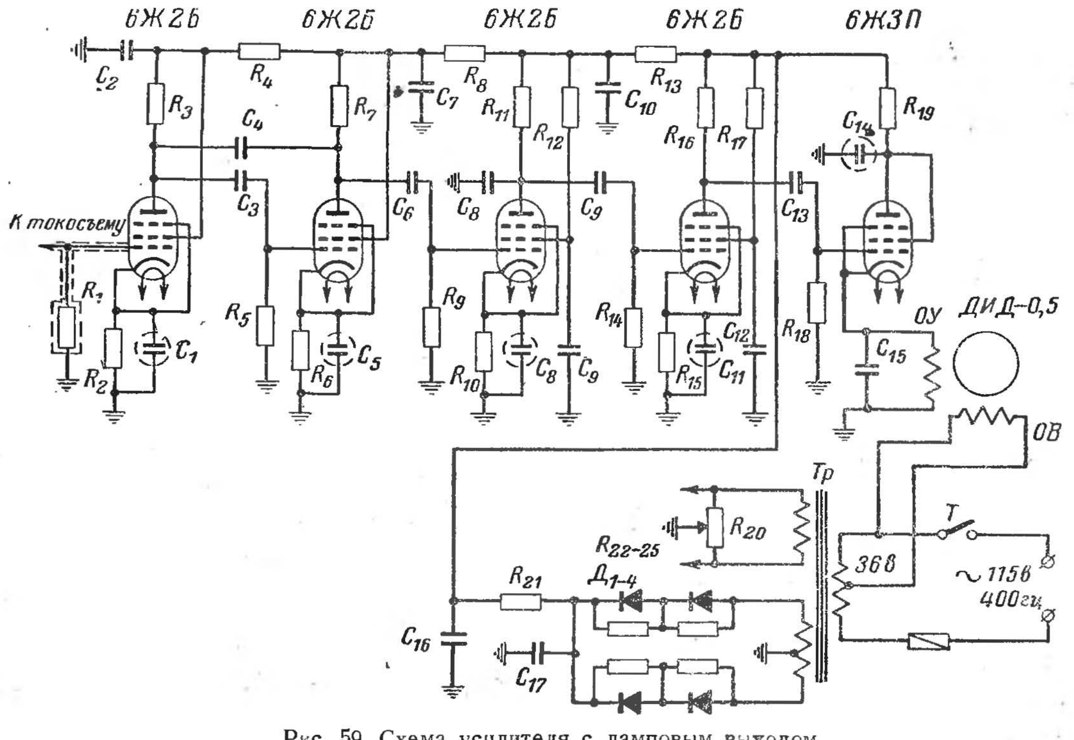


Рис. 59. Схема усилителя с ламповым выходом.

путем изменения параметров усилителя. Специальной регулировки усиления в схеме не предусмотрено.

Данный усилитель удовлетворительно работает, если нагрузкой выходного каскада является обмотка управления двигателя, сопротивление которой не менее 500 *ом* (у двигателя ДИД-0,5 сопротивление обмотки управления при последовательном включении обеих ее половин составляет 520 *ом*); в противном случае необходимо ставить на

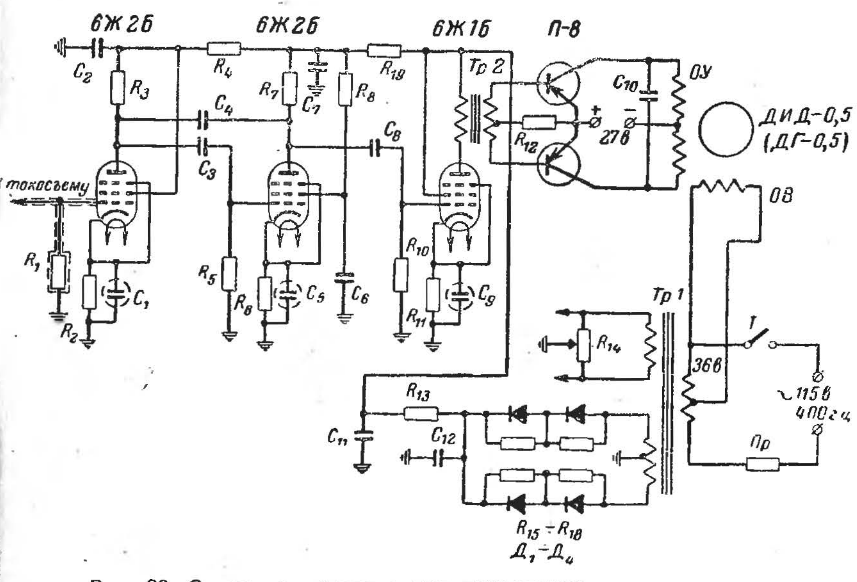


Рис. 60. Схема усилителя с полупроводниковым выходом.

выходе усилителя выходной трансформатор, согласующий выходную лампу с нагрузкой, либо более мощную, чем 6Ж3П, лампу, либо выходной каскад строить на полупроводниковых триодах. Так, двигатель ДГ-0,5 в описанной схеме работает плохо, так как сопротивление его обмотки возбуждения составляет всего около 40 *ом*.

Для последнего случая более пригоден усилитель, изображенный на рис. 60. Здесь выходной каскад выполнен на полупроводниковых триодах, включенных по двухтактной схеме. Связь между оконечным каскадом и предоконечным осуществлена через малогабаритный понижающий трансформатор, собранный на железе Ш-5. Питание выходного каскада осуществляется либо от постороннего источника,

либо от отдельного выпрямителя, не предусмотренного в данной схеме.

Данный усилитель удовлетворительно работает как с двигателем ДГ-0,5, так и с двигателями ДИД-0,5, ДИД-1 и некоторыми другими двигателями до температуры +60° С, развивая коэффициент усиления до 100 000.

Ниже приведены данные элементов схемы[1].

Усилитель, собранный по схеме рис. 59:
R_1, R_5, R_{10} — 1 *Мом;*
R_3, R_4, R_7 — 39 *ком;*
R_2, R_6 — 3,3 *ком;*
R_8 — 4,7 *ком;*
R_9 — 24 *ком,*
R_{11} — 150 *ом;*
R_{12} — 10 *ом;*
R_{13} — 2 *ком;*
R_{14} — 470 *ом;*
R_{15} — R_{18} — 220 *ком.*
Все сопротивления марки МЛТ; R_{14} — марки ППЗ-11.
C_1, C_6, C_9 — 25 *мкф*×4 *в;*
C_2, C_7, C_{11}, C_{12} — 1,0 *мкф* (МБМ);
C_3, C_8 — 1 — 3,3 *пф;*
C_4 — 50 — 330 *пф;*
C_{10} — 0,5 *мкф.*
$Д_1$ — $Д_4$ — Д7Ж.
Силовой трансформатор собран на железе Ш-12, пакет 10 *мм.*
Обмотки:
I — 216 *в* (ПЭВ-0,22) + 475 *в* (ПЭВ-0,3)
II — 30 *в* (ПЭВ-0,5);
III — 2×1 100 *в* (ПЭВ-0,1)
Межкаскадный трансформатор собран на железе Ш-5, пакет 5—8 *мм.*
Обмотки:
I — 6 000 *в* (ПЭВ-0,05);
II — 200 + 200 *в* (ПЭВ—0,2).
Усилитель, собранный по схеме рис. 60:
R_1, R_5, R_9, R_{14} — 1,0 *Мом;*
R_2, R_6 — 10 *ком;*
R_{10}, R_{16} — 3,3 *ком;*
R_3, R_8 — 20 *ком;*
R_4, R_7, R_{11}, R_{16} — 39 *ком;*
R_{12}, R_{17} — 47 *ком;*
R_{13} — 20 *ком;*
R_{19} — 2 *ком;*
R_{21} — 2 *ком;*
R_{22} — R_{25} — 220 *ком;*
R_{20} — 470 *ом.*

---

[1] При отладке усилителей не следует стремиться в точности придерживаться указанных параметров; оставляя схему в неизменном виде, следует величины подобрать так, чтобы обеспечивались необходимый коэффициент усиления и сдвиг фазы.

Все сопротивления марки МЛТ, R_{20} — марки ППЗ-11.
C_1, C_5, C_7, C_{11} — 25 *мкф*×4 *в*;
C_2, C_7, C_{10}, C_{17} — 1,0 *мкф* (МБМ);
C_3, C_6, C_8, C_9, C_{13} — 1 — 3,3 *Тф*;
C_4 — 50 — 330 *пф*;
C_{14} — 5,0 ×300;
C_{15} — 0,5;
$Д_1$ — $Д_4$ — Д7Ж.
Силовой трансформатор собран на железе Ш-12, пакет 15 *мм*.
Обмотки:
I 144 *в* (ПЭВ-0,25) + 316 *в* (ПЭВ-0,35 — 0,4);
II 26 *в* (ПЭВ-0,6 — 0,7);
III 2×800 *в* (ПЭВ-0,12).

В качестве выходного каскада для двигателя ДИД-0,5 могут быть использованы триоды 6С7Б или 6С6Б (либо 6Ж1Б или 6Ж2Б в триодном режиме), включенные по схеме усилителя напряжения с анодной нагрузкой около 20 *ком*. Напряжение с анодной нагрузки через конденсатор 0,5—1,0 *мкф* поступает в управляющую обмотку двигателя, обе половины которой включены последовательно. Второй конец обмотки управления заземляется.

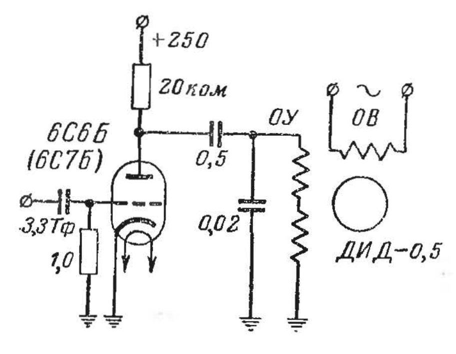


Рис. 61. Выходной каскад на лампе „дробь".

Такой каскад обеспечивает до 15—20 *в* переменного напряжения на обмотке управления двигателя ДИД-0,5. Схема каскада приведена на рис. 61.

3. Рекомендации по построению и отладке следящих систем переменного тока

От дистанционной следящей системы, в которой применен емкостный дифференциальный датчик, как правило, требуется высокая точность показаний. Между тем, в системе имеется ряд узлов, обладающих инструментальными погрешностями — сам емкостный датчик, отрабатывающий элемент — сельсин или потенциометр, редуктор, устройство привода ротора датчика. Кроме того, часто требуется ввести небольшие дополнительные отклонения показаний в определенных точках шкалы. Всем этим требованиям

удовлетворяет следящая система, в которой применен механический корректор (лекало).

Существует много схем и конструкций механических корректоров. Одна из них изображена на рис. 62. Входная ось корректора подключена к редуктору, соединенному со стрелкой указателя, выходная ось соединена с ротором отрабатывающего элемента. На входной оси располагается водило с роликом, к которому прикреплена вилка. В вилку входит палец выходной оси. При повороте входной оси ролик обкатывается по ленте, закрепленной на винтах, рас-

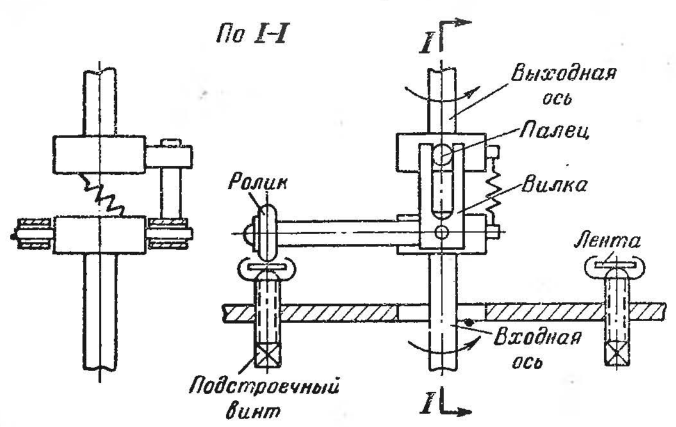


Рис. 62. Схема механического корректора (лекала).

положенных по окружности. При повороте этих винтов изгибается лента лекала, ролик, обкатывая ленту, поднимается или опускается по ней, при этом ролик поднимает или опускает водило. Вилка, закрепленная на водиле, поворачивается на некоторый угол и через палец выходной оси поворачивает ее на дополнительный угол. Таким образом, дополнительный угол поворота выходной оси пропорционален перемещению подстроечного винта в данной точке. Настраивая винты корректора, можно с хорошей точностью выбрать инструментальные погрешности всех элементов системы.

Регулировочная способность подобного лекала 2—3°, что обычно достаточно.

Не последнее место в работе следящей системы занимает ее механическая часть. К этой части системы относятся механизм датчика и механизм указателя (отрабатывающего узла).

Перед тем как приступать к отлаживанию системы, нужно устранить все затирания в подвижных элементах механизмов. Редуктор указателя проверяется в собранном виде на напряжение трогания. Напряжение трогания всего указателя не должно быть более чем в 1,5—2 раза больше напряжения трогания двигателя (для индукционных двигателей).

В механизме датчика следует обратить особое внимание на качество обработки подпятников и штифтов.

Наличие затираний в датчике очень заметно проявляется в собранной системе. Затирания в датчике приводят к повышенному гистерезису. При этом систему нужно пробовать в режиме малых отклонений от положения равновесия. Затирания в указателе определяются путем отвода указателя от положения равновесия системы на малое рассогласование. Затирания в датчике определяются после определения затираний в указателе путем изменения входной величины на малую величину в обе стороны на минимальной скорости.

О наличии затираний в системе можно судить по характеру ее работы на малых скоростях.

Как правило, трение покоя больше трения движения. Поэтому при малой скорости изменения угла поворота ротора датчика и неподвижном указателе рассогласование медленно нарастает. Наконец, сигнал рассогласования оказывается достаточным для преодоления трения покоя, и стрелка указателя сдвигается с места, выбирая рассогласование. По достижении некоторого минимального рассогласования указатель останавливается, а затем снова сдвигается с места.

Таким образом, если при неподвижном роторе датчика система не подвержена автоколебаниям, а при медленном изменении угла поворота ротора датчика отработка происходит рывками, как при наличии автоколебаний, можно сделать вывод о наличии механических затираний в редукторе указателя.

Аналогично, затирания в датчике проявляют себя подобным же образом. Так, в датчике давления при медленном изменении давления и при наличии затираний ротор датчика будет поворачиваться не плавно, а рывками, о чем можно судить по сигналу рассогласования, снимаемого с ротора датчика при заторможенном отрабатывающем двигателе указателя.

Люфты в системе также значительно влияют на качество ее работы.

Люфт в датчике приводит также к вариации показаний при малых отклонениях системы от положения равновесия. Люфт в редукторе от двигателя к стрелке указателя также приводит к появлению гистерезиса, отделить его от люфта в датчике можно, отводя указатель от положения равновесия системы. Люфт в редукторе от двигателя к отрабатывающему элементу (сельсину, потенциометру) приводит к появлению гистерезиса или вариации обратного знака.

Для облегчения работы редуктора указателя при про-

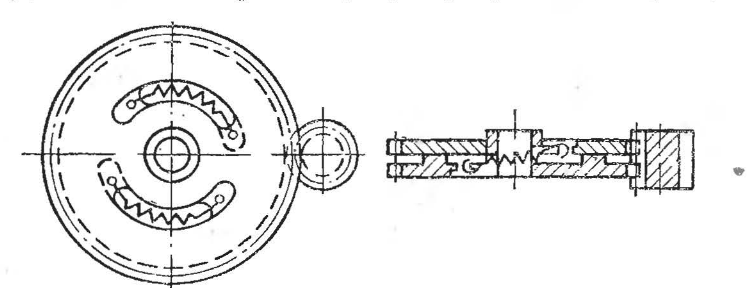


Рис. 63. Безлюфтовое зубчатое зацепление.

ектировании системы следует руководствоваться следующими соображениями:

1. Редуктор может быть разветвленным, но он должен иметь плавное понижение числа оборотов от двигателя ко всем конечным точкам ответвлений.

Не следует допускать в редукторе наличия повышающих передач. Повышение числа оборотов приводит к появлению дополнительных затираний в цепи повышающего редуктора на переходных процессах, кроме того, наличие повышающего редуктора приводит к более быстрому износу зубьев той шестерни, от которой начинается повышение.

2. Редуктор должен исполняться по возможности безлюфтовым (например, на разрезных шестернях с пружинами — рис. 63). При этом требования к отсутствию люфтов тем жестче, чем дальше от двигателя расположена данная пара шестерен. Первые две пары шестерен желательно делать обычными для облегчения работы двигателя.

3. Иногда для уменьшения люфтов в подвижных частях механизмов употребляются пружины. Пружины в механизме необходимо устанавливать так, чтобы на всем диапазо-

не работы устройства натяжение пружин не менялось. Примером правильного выполнения таких пружин являются безлюфтовая шестерня и пружина на лекале. Желательно избегать крепления пружин одним концом за подвижную деталь с большим перемещением, другим концом — за неподвижную.

При установке нескольких пружин нужно следить за тем, чтобы их усилия не компенсировали друг друга, а складывались.

Радиальный люфт в цапфах приводит также к угловой погрешности. Для его устранения желательно в наиболее ответственных местах употреблять шариковые подшипники.

Однако удовлетворительной работы одной лишь механической части недостаточно. Электрическая часть также должна работать нормально.

Так, усилитель должен не только развивать необходимый коэффициент усиления, но и не самовозбуждаться в установившемся состоянии системы. О наличии самовозбуждения усилителя можно судить, помимо осциллографа, непосредственно по дрожанию вала двигателя, а также по отдельным хаотическим смещениям его ротора.

Усилитель должен иметь необходимый сдвиг фаз.

Коэффициент усиления системы с индукционным двигателем равен:

$$k = k_{р} \sin \varphi, \qquad (84)$$

где $k_{р}$ — расчетный коэффициент усиления;

φ — сдвиг фаз напряжений возбуждения и управления.

При $\varphi = 90°$ коэффициент усиления максимальный.

Необходимый сдвиг фаз можно получить шунтировкой емкости ламп усилителя и другими способами. Контроль за сдвигом фаз можно осуществлять либо по фигурам Лиссажу, либо фазометром. При построении фигур Лиссажу на осциллографе нужно помнить, что вертикальный и горизонтальный входы осциллографа имеют общую землю, в то время как часто нельзя гальванически соединять между собой цепи возбуждения и управления двигателя. Поэтому их нужно разделять конденсаторами.

Иногда приходится стабилизировать переходный процесс системы. Тогда требуется вводить производную от рассогласования, для чего в системах переменного тока

применяют либо двойные Т-образные звенья, либо тахогенераторы переменного тока.

В следящих системах переменного тока для стабилизации переходного процесса целесообразно применять тахогенераторы переменного тока, характеристики которых зависят от частоты гораздо меньше, чем характеристики Т-образных звеньев, а главное, они не влияют на статический коэффициент усиления.

Промышленностью выпускаются двигатели типа ДГ с вмонтированным в них тахогенератором. В качестве тахогенератора можно также использовать индукционный двигатель, посаженный на ось приводящего двигателя либо сцепленный с ним общей паразитной шестерней.

Глава шестая

ПРИМЕРЫ ПОСТРОЕНИЯ ПРИБОРОВ С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМИ ЕМКОСТНЫМИ ДАТЧИКАМИ

В качестве примеров построения систем с емкостными дифференциальными датчиками рассмотрим несколько схем приборов, в которых эти датчики применены.

Акселерометр [Л. 15, Л. 16]

Акселерометром называется прибор, служащий для измерения ускорений. В некоторых случаях требуется измерять ускорения с большой точностью.

Существует много различных принципов, позволяющих измерять ускорения. Большинство этих способов имеют существенный недостаток, заключающийся в том, что чувствительный элемент, используемый в них (неуравновешенная масса, неуравновешенный гироскоп и т. д.), в реальных конструкциях закреплен на жестких опорах. Эти опоры создают заметное трение в узле чувствительного элемента, не позволяющее сильно увеличивать диапазон измерения и создающее границу чувствительности.

В описываемом ниже приборе этот недостаток полностью устранен. В данном акселерометре неуравновешенная масса закреплена на растянутой гибкой нити, подобной тем, которые употребляются для подвеса рамок гальванометров и зеркалец осциллографа, выполненной либо из фосфористой бронзы, либо из кварца, покрытого тонкой пленкой золота. Такая нить, обладая значительным макси-

мальным углом закручивания (120—160°), обладает исчезающе малым собственным трением, что позволяет в одном диапазоне иметь высокую чувствительность и высокую точность, достигающую 0,001%.

В данной конструкции (рис. 64) на вертикальной подвижной рамке *1* натянута нить *2*, на которой закреплена легкая лопаточка *3*. Лопаточка заземлена и является ротором емкостного дифференциального датчика с неподвиж-

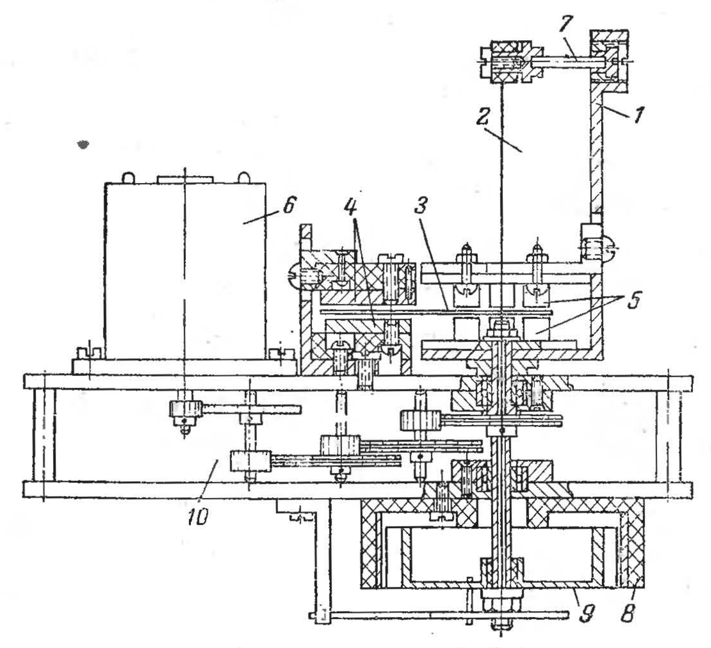


Рис. 64. Акселерометр с гибкой нитью.

ным токосъемом *4*. При возникновении ускорения мост, включающий в себя емкостный датчик, разбалансируется. Сигнал с моста подается в усилитель, а затем на отрабатывающий двигатель. Двигатель *6* через редуктор *10* вращает рамку *1*, которая закручивает нить и возвращает лопаточку *4* в положение равновесия моста. Так как момент, создаваемый нитью, пропорционален углу закручивания, то угол поворота рамки пропорционален ускорению, и показания прибора могут быть считаны любым известным способом с помощью, например, стрелки со шкалой. кодового диска и т. п.

Диапазон измерения в данной конструкции определяется в основном допустимым временем переходного процесса системы.

В связи с тем, что трение лопаточки в нити и о воздух очень мало, затухание колебаний возникающих при изменении ее положения (частота возникающих колебаний составляет несколько герц), происходит очень медленно (минуты). Поэтому у лопаточки устанавливается магнитная система из постоянных магнитов от тахометра *5*, создающая демпфирование и успокаивающая колебания. При зазоре в системе магнитов 1,5—2 *мм* затухание колебаний происходит за 1—2 *сек.*

При конструировании акселерометра возникает вопрос о температурной компенсации.

При повышении температуры удельный момент нити линейно уменьшается примерно на 0,02%/*град*. Так как общий диапазон изменения температуры составляет обычно 110° С (от —50° С до +60° С), точность измерения составит всего ±1,1%. Поэтому необходима температурная компенсация.

Удельный момент нити равен [Л. 17]:

$$M_{уд} = 2\left(\frac{1}{3} bh^3 \frac{G}{l} + \frac{1}{12}\cdot\frac{b^2}{l} F + \frac{1}{360}\cdot\frac{b^5 h\alpha}{l^3} E\right), \qquad (85)$$

где G — модуль сдвига, $G \approx 0{,}65E$;
b, h, l — ширина, толщина и длина одной растяжки;
F — натяжение нити;
α — угол закручивания.

Для растяжки с размерами: $b = 0{,}3$ *мм* $= 3\cdot10^{-4}$ *м*; $h = 0{,}1$ *мм* $= 1\cdot10^{-4}$ *м*; $l = 30$ *мм* $= 3\cdot10^{-2}$ *м* и модулем Юнга $E = 9\cdot10^6$ *кГ/м²*, $G = 0{,}65E \approx 6\cdot10^9$ *кГ/м²* и удельной допустимой нагрузкой $f = 40$ *кГ/мм²* сила натяжения определится из выражения:

$$F = fbh = 40\cdot0{,}3\cdot0{,}1 = 1{,}2\ кГ.$$

Принимаем $F_0 = 0{,}6$ *кГ*; $\Delta F_0 = \pm0{,}3$ *кГ*, тогда

$$M_{уд} = A + B + C,$$

где

$$A = \frac{2}{3} bh^3 \frac{G}{l} = \frac{2\cdot3\cdot10^{-4}\cdot10^{-12}\cdot6\cdot10^9\cdot10^5}{3\cdot3\cdot10^{-2}} = 4\ Г\cdot см/рад;$$

$$B = \frac{2}{12}\cdot\frac{b^2}{l} F = \frac{2\cdot3^2\cdot10^{-8}\cdot600\cdot10^3}{12\cdot3\cdot10^{-2}} = 0{,}3\ Г\cdot см/рад;$$

$$C = \frac{2b^5 hE}{360 l^3}\alpha = \frac{2\cdot10^{-20}\cdot10^{-4}\cdot9\cdot10^9\cdot10^5}{360\cdot3^3\cdot10^{-6}} = 4{,}5\cdot10^{-5}\,\alpha;$$

$$M_0 = A + B = 4{,}3 \ Г \cdot см/рад;$$

$$\Delta M(t) = \pm \frac{B}{2} \pm 0{,}15 \ Г \cdot см/рад;$$

$$\Delta M(\alpha) = C = 4{,}5 \cdot 10^{-5} \alpha.$$

Ошибка, возникающая от $\Delta M(\alpha)$ (нелинейность), при $\alpha_{макс} = 2$ *рад* составляет $9 \cdot 10^{-5}$ *Г·см/рад*, а ее относительная погрешность $\frac{\Delta M(\alpha_{макс})}{M_0} = \frac{9 \cdot 10^{-5}}{4{,}3} = 0{,}002\%$, что допустимо даже при диапазоне измерения 10^5. Отношение же $\frac{\Delta M(t)}{M_0} = \frac{\pm 0{,}15}{4{,}3} = \pm 0{,}035 = \pm 3{,}5\%$.

Таким образом, подбирая материал рамки или применяя биметалл и регулируя натяжение нити, можно за счет члена $\Delta W(t)$ сделать систему не зависимой от температуры.

Определим размеры и вес лопаточки ротора.

Рассмотрим случай, когда прибор используется в качестве акселерометра. В этом случае закручивание нити в установившемся состоянии системы (по завершении отработки) пропорционально ускорению. Положим: $\alpha_{макс} = 30°$; $a_{макс} = 1g$.

Язычок лопаточки имеет вес P с центром тяжести, удаленным от нити на расстояние l. При максимальном ускорении $1g$ нить согласно условию должна закручиваться на 30°. При этом противодействующий момент будет равен:

$$M = M_0 \frac{\alpha_{макс}}{57{,}7} = 2{,}24 \ Г \cdot см.$$

При $l = 3$ *см*

$$P = \frac{M}{l} = \frac{2{,}24}{3} = 0{,}75 \ Г.$$

Положим площадь язычка лопаточки $S = 3$ *см*², удельный вес $\gamma = 8{,}9$ *г/см*³ (латунь). Тогда толщина лопаточки

$$\delta = \frac{0{,}75}{8{,}9 \cdot 3} = 0{,}028 \ см = 0{,}28 \ мм.$$

В приборе установлен емкостный датчик с переменной S с неподвижным токосъемом (лопаточка заземлена через нить), описанный в примере гл. 2, § 2.

При чувствительности акселерометра $a_{мин} = 10^{-5} g$ лопаточка отклонится на угол

$$\alpha_{мин} = \alpha_{макс} \frac{a_{мин}}{a_{макс}} = \frac{30}{1} 10^{-5} = 3 \cdot 10^{-4} \ град = 1{,}08''.$$

Следовательно, и расчет коэффициента усиления, приведенный в том же примере, пригоден для данного случая.

При использовании прибора в качестве уровня на лопаточку будет действовать составляющая силы тяжести, направленная перпендикулярно к нити и равная:

$$Q = P \sin \psi, \tag{86}$$

где ψ — угол наклона прибора;

P — вес лопаточки.

Уравнение моментов примет вид:

$$M = M_0 \alpha = P \sin \psi l.$$

Так как при малых углах $\sin \psi \approx \psi$ (ψ исчисляется в радианах), то

$$Pl = \frac{\alpha}{\psi} M_0, \tag{87}$$

откуда следует, что для повышения чувствительности прибора, помимо коэффициента усиления, нужно повышать момент лопаточки, что обычно делается за счет ее веса.

Для съема показаний прибора целесообразно применить емкостный трехлучевой датчик с большой редукцией, например равной 60 (см. гл. 3, § 1), сигнал с которого подается в отдельный усилитель, а оттуда — на отрабатывающий двигатель указателя-индикатора. Один оборот стрелки указателя равен $60'' = 1'$; цена деления равна $1''$; один оборот сельсина указателя равен $6°$ поворота ротора датчика.

Положим, $\frac{\alpha}{\psi} = 1$ (при малых углах), тогда коэффициент редукции между стрелкой и сельсином равен 360 (редуктор безлюфтовый). Коэффициент редукции между двигателем указателя и стрелкой можно принять равным 20—30.

При $l = 3$ *см* и $S = 3$ *см*^{2} при тех же данных нити

$$P = \frac{4,3}{3} = 1,43 \ \Gamma;$$

$$\delta = \frac{1,43}{8,9 \cdot 3} = 0,53 \ \text{мм}.$$

При заданной чувствительности $1''$ коэффициент усиления прежний.

Нить в описанном приборе крепится одним концом к биметаллу, эквивалентная длина которого может ме-

няться при настройке температурной компенсации, другим концом — непосредственно к рамке.

Регулировка прибора осуществляется настройкой противовеса, укрепленного на лопатке.

Основным недостатком данного прибора является трудность получения высоких динамических характеристик в связи с тем, что система в общем при малых значениях передаточного отношения редуктора (при высоких скоростях отработки) склонна к автоколебаниям. Поэтому наилучшее применение этот прибор может найти там, где не требуется высокой скорости отработки, например в качестве уровня. Аналогичным прибором в лабораторных условиях было устойчиво измерено ускорение 10^{-5} g. Точность установки платформы с помощью такого прибора может достигать единиц угловых секунд и даже десятых долей.

Микрометр

Для целого ряда производств нужна высокая точность измерений длины, достигающая единиц и даже десятых долей микрона. К таким измерениям можно отнести контроль размеров деталей подшипников, снятие характеристик анероидных коробок и многие другие. Микрометр, предназначенный для снятия характеристик анероидных коробок, получил название катетометра. В подавляющем большинстве случаев необходимо, помимо получения высокой точности измерения, автоматизировать сам процесс измерения. Этим требованиям удовлетворяет автоматический микрометр повышенной частоты, кинематическая схема которого изображена на рис. 65.

В данной конструкции применен емкостный дифференциальный винтовой датчик. При перемещении щупа *1* перемещается ротор датчика *2*. Через безмоментный волосок *3* снимается сигнал рассогласования, поступающий в усилитель, а оттуда — в двигатель *4*. Двигатель через редуктор *5* вращает статор *6* до положения согласования. Одновременно с этим вращаются стрелки *7*, с помощью которых происходит отсчет показаний. Стрелки *7* перемещаются по шкале *8* с ценой деления 0,1 *мк*.

Ротор датчика закреплен на тонкой оси, конец которой выходит за пределы датчика и заканчивается щупом *1*. Опоры ротора, закрепленные неподвижно относительно всего прибора, позволяют ротору свободно перемещаться вдоль оси. На щупе укреплен палец *9*, скользящий по

Рис. 65. Микрометр с емкостным винтовым датчиком.

стойке *10*. На щупе закреплен также волосок *11*, второй конец которого закреплен на пальце. Волосок несколько растянут вдоль оси и закручен так, что палец *9* все время прижат к стойке *10*, что предохраняет ротор от проворота, не мешая его свободному перемещению вдоль оси, так как натяг волоска вдоль оси подбирается несколько бо́льшим, чем усилие трения, возникающее между пальцем и стойкой. Если палец и стойка выполнены соответственно из латуни и стали, а поверхности их отполированы, это усилие составляет всего доли грамма, а общее усилие вдоль оси вместе с весом ротора составляет лишь 2—3 *Г*.

Сам ротор жестко посажен на изоляционную втулку, которая в свою очередь закреплена жестко на оси. Верхняя часть оси ротора выполнена полой, сквозь нее пропущен проводник, которым выводится сигнал с ротора на изоляционный элемент («слезку»), закрепленный на верхнем конце оси. Со «слезки» сигнал передается на неподвижную стойку посредством безмоментного волоска, откуда передается на вход усилителя. Верхняя часть датчика экранирована колпаком.

Обойма статора датчика закреплена в подшипниках качения прецизионного или высшего класса, причем посадка подшипников и обоймы статора датчика такова, что полностью исключает как осевой, так и радиальный люфты. Сам статор внутри обоймы закреплен жестко.

Редуктор между стрелкой и статором датчика выполняется безлюфтовым. Остальная часть редуктора имеет нормальный люфт. Особое внимание обращено на отсутствие люфтов в цапфах редуктора, ибо они могут привести к значительным погрешностям. Две последние оси редуктора крепятся в шариковых подшипниках с внутренним диаметром 1 *мм* (в крайнем случае 2 *мм*). При параметрах винтового датчика, приведенных в гл. 3, § 2, и цене деления 0,1 *мк* на шкале точного отсчета имеется 100 делений, цифры наносятся через 10 делений (через 1 *мк*). Грубую шкалу целесообразно выполнить либо в виде десятичного механического счетчика, состоящего из трех барабанов с ценой деления соответственно 10 *мк*, 100 *мк*, 1 *мм*, либо также со стрелками. Передаточное отношение редуктора от стрелки точного отсчета до статора датчика — 1 000, от двигателя до стрелки — 100—150.

В реальных условиях микрометр крепится на каком-либо штативе. К этому штативу должны быть предъявлены высокие требования в отношении жесткости и остаточных

деформаций. Кроме того, при работе с подобным прибором необходимо либо учитывать температурные расширения штатива, щупа, основания и т. п. (что, вообще говоря, нетрудно сделать путем предварительной тарировки прибора на разных температурах), либо поддерживать постоянной температуру в помещении, где установлен этот микрометр.

Прибор для измерения давления газа (барометр)

В некоторых случаях возникает необходимость точного измерения давления газов, в частности воздуха, в пределах от единиц атмосфер до единиц миллиметров ртутного столба. Разработанные и применяющиеся в настоящее время ртутные барометры неудобны в обращении, вредны для здоровья и пригодны только для лабораторных условий. Ртутные барометры обеспечивают точность 0,1 *мм рт. ст.* Применяемые механические барометры и барографы имеют точность всего лишь около 1 *мм рт. ст.*, что зачастую недостаточно.

Ниже описана схема анероидного (безртутного) прибора, который может быть использован в качестве дистанционного барометра с точностью измерения 0,2—0,3 *мм рт. ст*, если он используется в неблагоприятных условиях, и с точностью около 0,1 *мм рт. ст.* в диапазоне давления 760—4 *мм рт. ст.*, либо 0,03—0,05 *мм рт. ст.* в диапазоне 20—2 *мм рт. ст.* при нормальных температурных условиях. В этом приборе чувствительным элементом является широко распространенная анероидная коробка.

Анероидная коробка представляет собой две круглые гофрированные мембраны с бортами, сваренными между собой. Изнутри коробки полностью выкачан воздух, и внешнее давление прогибает мембраны внутрь, обычно на величину, пропорциональную этому давлению. Измеряя прогиб мембран анероидной коробки, можно судить о внешнем давлении газа (воздуха), действующего на коробку.

Если анероидная коробка нагружена на механический редуктор, как это сделано в барографах и авиационных высотомерах, мембранам необходимо развивать некоторое дополнительное усилие для преодоления сил трения в редукторе, в связи с чем возникают большие погрешности в виде гистерезиса прибора, вызванного гистерезисом самой анероидной коробки и трением в редукторе. Самим мембранным коробкам свойственно так называемое «остаточ-

ное последействие», заключающееся в том, что гистерезисная ошибка в начале диапазона с течением времени снижается.

Для уменьшения относительной погрешности гистерезиса и остаточного последействия необходимо увеличить толщину материала мембран, тем самым уменьшив удельное напряжение в материале. Однако одновременно с этим уменьшается ход коробки, что недопустимо для механических приборов.

В описываемом ниже анероидном приборе анероидный блок приводит в движение лишь ротор емкостного дифференциального датчика. При этом усилие трения составляет доли грамма. Поэтому погрешность этого прибора значительно меньше, чем у механических приборов.

В приборах с емкостными датчиками не нужно иметь большой ход анероидной коробки. На весь диапазон измеряемого давления в описываемом приборе ход коробки составляет всего около 2—3 *мм* при изменении давления от 800 до 4 *мм рт. ст.* вместо 4—5 *мм* в механических приборах, что позволяет значительно снизить гистерезис мембран и остаточное последействие, которые составляют примерно по 0,2 *мм рт. ст.*

В некоторых случаях необходимо по величине давления судить о какой-либо другой величине, связанной функционально с давлением. Так, в некоторых счетно-решающих приборах отработка должна происходить пропорционально не давлению, а его логарифму. В этом случае целесообразно применить трехлучевой емкостный датчик (плоский или цилиндрический), обладающий достаточно широкой регулировкой. Описываемый прибор может быть легко отрегулирован пропорционально давлению.

Блок датчика анероидного прибора с трехлучевой емкостной передачей изображен на рис. 66.

Прибор состоит из блока датчика и указателя.

В передней части блока датчика размещен собственно емкостный датчик, анероидная коробка, кривошипно-шатунный механизм, посредством которого анероидная коробка приводит в движение ротор емкостного датчика. В задней части блока датчика размещен усилитель (кроме выпрямителя и выходного каскада).

В указателе размещаются узел отсчета логарифма давления, включающего в себя отрабатывающий двигатель, ротор отрабатывающего сельсина, стрелки и счетчик отсчета логарифма давления, механический корректор и соеди-

няющие их редукторы, а также узел смещения начала отсчета, включающего в себя статор отрабатывающего сельсина, счетчик смещения начала отсчета, кремальеру, посредством которой смещается начало отсчета логарифма давления, и соединяющие их редукторы. В задней части указателя размещены выпрямитель, обслуживающий усилитель, и выходной каскад усилителя.

Статор сельсина закреплен в обойме, в которую вмонтирован механический корректор. Обойма закреплена в шестерне, вращающейся от кремальеры через редуктор. Жесткая связь корректора со статором сельсина обеспечивает постоянство регулировки прибора при смещении нуля отсчета.

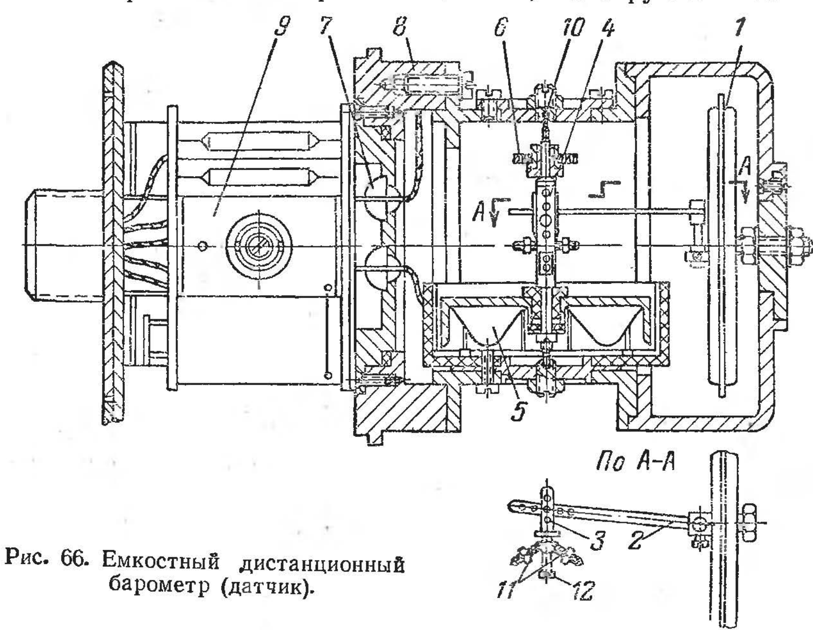


Рис. 66. Емкостный дистанционный барометр (датчик).

При конструировании указателя особое внимание уделено отсутствию люфтов в узлах крепления статора сельсина, корректоре и редукторах. Обойма статора сельсина помещена в коническом подшипнике качения и прижимается пружинной шайбой, так что люфтов (ни радиальных, ни осевых) в этом узле нет: кроме того, конструкция предусматривает отсутствие люфтов в последних ступенях редукторов статора и ротора сельсина.

Передняя часть блока датчика соединена с измеряемым давлением через штуцер. При изменении давления перемещается жесткий центр анероидной коробки *1*, который через тягу *2* кривошипно-шатунного механизма и вилку *3* поворачивает ось *4* ротора датчика *5*. Ротор изолирован от оси и помещен на ее нижнем конце. Сигнал с ротора снимается посредством волоска *6*, укрепленного на верхнем конце оси и также изолированного от оси, передается в усилитель через стеклянные «слезки» *7*, впаянные в основание датчика *8* и позволяющие передать сигнал из переднего отделения, не нарушая его герметизации, в усилитель *9*.

Тяга с коробкой и вилкой соединены полированными штифтами. Ось ротора крепится в шариковых подшипниках *10* с внутренним диаметром 1 *мм*. Волосок, передающий сигнал, одновременно выбирает люфты из всех подвижных соединений.

Для динамической сбалансированности прибора на оси ротора со стороны, противоположной вилке, укреплены под углом 120° друг к другу и к оси вилки два винта *11* с перемещающимися гайками, служащими противовесами.

При настройке прибора необходимо на полном диапазоне изменения давления устанавливать угол поворота ротора датчика, соответствующий 180° эл. При редукции датчика, равной шести, этот угол составит 30° эл. Для этого на вилке предусмотрены отверстия, переставляя по которым штифт, соединяющий тягу с вилкой, можно регулировать длину вилки. Для точной регулировки угла служит подстроечный винт *12*, укрепленный в оси ротора и отгибающий биметаллическую планку, на которой и укреплена вилка. Шаг отверстий в вилке равен 1,5—2 *мм*. На такую же величину можно отгибать биметалл подстроечным винтом. Начальный угол между вилкой и тягой устанавливается во избежание перегиба характеристики кривошипа прмерно равным 90°. Для установки этого угла в тяге также предусматривается ряд отверстий.

При наладке прибора возникает вопрос стабильности его показаний при изменениях температуры окружающей среды. Наиболее просто этот вопрос решается путем термостатирования датчика. В передней части датчика устанавливается биметаллическое реле, включающее и выключающее обогрев в зависимости от температуры внутри передней части блока датчика. Обогрев выполняет-

ся в виде цилиндра из миканитовой ленты, вокруг которой обмотан константановый провод. Обычно мощности 70—100 *вт* достаточно для поддержания постоянной температуры внутри датчика.

Вторым способом температурной стабилизации показаний прибора является применение биметаллов первого *13* и второго *14* родов.

При изменении температуры происходит, во-первых, изменение размеров всех деталей на величину, пропорциональную температуре; во-вторых, меняется жесткость коробки.

Анероидная коробка с повышением температуры становится более мягкой, и поэтому наружным давлением прогибается внутрь на некоторую величину, которая, как правило, больше всех остальных деформаций прибора. Поэтому первая ошибка направлена в сторону увеличения давления. Эта ошибка компенсируется биметаллом первого рода, укрепленного на жестком центре мембраны и соединенного с тягой. Однако, помимо постоянного смещения показаний в начале диапазона, происходит в связи с изменившейся жесткостью коробки изменение показаний по всему диапазону на величину, пропорциональную давлению. Для компенсации этой второй ошибки вилка крепится на биметалле второго рода, закрепленного на оси ротора датчика, поэтому с изменением температуры меняется плечо кривошипно-шатунного механизма и компенсируется ошибка, пропорциональная давлению. Для подстройки этой ошибки в оси ротора просверлен ряд отверстий. Винт, служащий для подстройки длины плеча кривошипно-шатунного механизма, может быть поставлен в любое из отверстий оси, а так как он упирается в биметалл, будет меняться тем самым длина биметалла при постоянстве длины вилки. Переставляя винт в этих отверстиях, можно добиться удовлетворительной температурной компенсации по давлению.

Компенсации указателя производить не нужно. Однако его показания будут стабильны лишь в том случае, если в указателе нет напряженных элементов.

Блок датчика располагается на амортизирующей платформе с резиновыми амортизаторами. Для гашения колебаний на собственной частоте дополнительно предусмотрены текстолитовые кольца, укрепленные на блоке датчика и перемещающиеся в металлических цилиндрах. Кольца трутся о стенки цилиндров и демпфируют колеба-

ния. В результате этого платформа с датчиком практически не имеет собственных колебаний.

Указатель с датчиком соединены экранированной электрической линией связи. В указатель в задней стенке вмонтирован предохранитель на 1 *а* для предохранения прибора от возможных ошибок на стендовых испытаниях. Питание в указатель подается через отдельный разъем.

Всесторонние испытания описанных систем показали их удовлетворительную работу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная книга представляет собой попытку обобщить имеющийся на сегодняшний день материал по емкостным дифференциальным датчикам перемещения, работающим на повышенной частоте.

До последнего времени авторы разработок относились к емкостным датчикам с некоторым предубеждением. Показательно, что если систем, в которых применены индуктивные и реостатные датчики, насчитываются тысячи, то устройств, в которых применены емкостные датчики, — единицы. Тем не менее, некоторые точные приборы удалось осуществить только после применения в них емкостных датчиков.

Несмотря на то, что описанные выше датчики не обязательно являются многообходными, а мощность, отдаваемая датчиками, мала, в связи с чем приходится употреблять усилители со значительным коэффициентом усиления, практика показала, что правильно выполненные подобные системы обладают достаточной помехозащищенностью и высокой эксплуатационной надежностью, не меньшей, чем многие другие системы.

Теория и конструкция емкостных датчиков еще недостаточно развиты, нерешенных вопросов в них осталось немало, но можно считать установленным, что емкостные датчики заслуживают широкого внедрения в измерительную технику и автоматику и дальнейшего развития и совершенствования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Туричин А. М., Электрические измерения неэлектрических величин, Госэнергоиздат, 1954.
2. Шляндин В. М., Элементы автоматики и телемеханики, Оборонгиз, 1959.
3. Сотсков Б. С., Основы расчета и проектирования элементов автоматических и телемеханических устройств, Госэнергоиздат, 1956.
4. Воронов А. А., Элементы теории автоматического регулирования, Оборонгиз, 1954.
5. Михлин Б. З., Радиоэлектронные приборы для производственного контроля, Госэнергоиздат, 1956.
6. Robson R. C., Coodier A., Penn R. G., Fully transistorized frequency modulated indicator for field tests, Engineering, 1959, 207, № 5380.
7. Богородицкий Н. П., Пасынков В. В., Тареев Б. Н., Электротехнические материалы, Госэнергоиздат, 1955.
8. Абрамов Б. М., Авторское свидетельство № 117622.
9. Кобринский Н. Е., Математические машины непрерывного действия, Гостехиздат, 1954.
10. Основы автоматического регулирования, под ред. В. В. Солодовникова, т. II. ч. 2, Машгиз, 1959.
11. Свечарник Д. В., Бесконтактные синхронно-следящие системы, „Автоматика и телемеханика", 1938, № 6.
12. Свечарник Д. В., Секционированные схемы автоматики и телемеханики, „Электричество", 1935, № 21.
13. Свечарник Д. В., Авторские свидетельства № 46293—1934 г; 48691—1935 г., 116184—1957 г.
14. Свечарник Д. В., Дистанционные передачи, Госэнергоиздат, 1959.
15. Ацюковский В. А., Авторские свидетельства № 113053 и 114083, 1958.
16. Smith B. O., Stevens J. W., Quick-acting chemica balance, Journal of Scientific Instrument, 1959, 36, № 5.
17. Арутюнов В. О., Расчет и конструирование электроизмерительных приборов, Госэнергоиздат, 1956.
18. Карпов Р. Г. Измерение давлений вида $P_0 + P(t)$, „Измерительная техника", 1959, № 6.
19. Green B. S., Capacitance in automatic control, British Communications and Electronics, 1955, № 11.
20. Filden Servograph (каталог фирмы).
21. Емкостный датчик контроля размеров, в сборнике „Датчики систем автоматического контроля и регулирования", Машгиз, 1959.

СОДЕРЖАНИЕ

„БИБЛИОТЕКА ПО АВТОМАТИКЕ“

Вышли из печати

Выпуск 1. *Шумиловский Н. Н. и Мельтцер Л. В.,* Применение ядерных излучений для автоматического контроля технологических процессов, 1958, г., ц. 2 р. 50 к.

Выпуск 2. *Богданов Д. И. и Евдокимов Г. К.,* Феррорезонансные стабилизаторы, 1958 г., ц. 2 руб.

Выпуск 3. *Вершинин Н. И и др.,* Автоматическое регулирование, 1959 г., ц. 3 р. 50 к.

Выпуск 4. *Декабрун И. Е.,* Электромагнитные поляризованные реле и преобразователи, 1959, г., ц. 2 р.

Выпуск 5. *Булгаков А. А.,* Программное управление металлорежущими станками, 1959 г., ц. 3 р.

Выпуск 6. *Катыс Г. П.,* Оптические датчики температуры, 1959 г. ц. 2 р.

Выпуск 7. *Крассов И. М.,* Гидравлические усилители, 1959 г., ц. 2 р.

Выпуск 8. *Юферов Ф. М.,* Электрические двигатели автоматических устройств, 1959 г., ц. 7 р. 30 к.

Выпуск 9. *Дружинин Г. М.,* Реле времени, 1959 г., ц. 2 р. 30 к.

Выпуск 10. *Круг Г. К. и Круг Е. К.,* Электрические корректирующие элементы в схемах автоматического контроля и регулирования, 1959 г., ц. 2 р. 45 к.

Выпуск 11. *Рожанский Л. Л.,* Статические электромагнитные преобразователи частоты, 1959 г., ц. 2 р. 85 к.

Готовятся к печати

1. *Архангельский В. И.* Бесконтактные схемы управления электроприводами реверсивных прокатных станов, ц. 2 р. 50 к.
2. *Васильев Р. Р. и Шастова Г. А.,* Передача телемеханической информации, ц. 3 р.
3. *Волосников В. П.,* Использование вычислительных машин для автоматизации электроприводов, ц. 2 р. 50 к.
4. *Воробьева Т. М.,* Электромагнитные муфты, ц. 2 р.
5. *Догановский С. А. и Иванов В. А.,* Блок регулируемого запаздывания, ц. 2 р.
6. *Ильин В. А.,* Системы телемеханики для рассредоточенных объектов, ц. 3 р.
7. *Лихачев В. А.,* Многоканальное быстродействующее регистрирующее устройство РУМБ, ц. 1 р. 50 к.
8. *Малов В. С.,* Телемеханика, ц. 2 р. 50 к.
9. *Митин И. Г.,* Подсводовый пирометр для мартеновских печей, ц. 1 р. 25 к.
10. *Уланов Г. М.,* Регулирование по возмущению (компенсация возмущений и инвариантность), ц. 2 р. 50 к.
11. *Бондаренко П. А.,* «Применение вычислительных машин для автоматизации доменных печей», ц. 2 р. 50 к.

ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
23	Формула (25) (3 раза)	$0{,}443 \cdot 10^{-8}$	$4{,}43 \cdot 10^{-8}$
52	Рис. 37	Горизонтальная линия должна быть проведена между вертикалями из точек L и R'	

В. А. Ацюковский, Емкостные дифференциальные датчики перемещения.